

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Модернізація системи керування тягового електропривода локомотива»

Виконав: студент 2 курсу, гр. ЕПА-23м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Освітня програма Електромеханічні
системи автоматизації та електропривод

В.П.

Ярослав ПУСТОВІТ

(імя ПРІЗВИЩЕ, підпис)

Керівник к.т.н., доцент каф. КЕМСК
Валентин ГРАБКО
(імя ПРІЗВИЩЕ, підпис)

«19» листопада 2024 р.

Опонент:

К.Т.Н. доц. Валентин ГРАБКО
(імя ПРІЗВИЩЕ, підпис)

«07» грудня 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри КЕМСК

Микола МОШНОРІЗ

(імя ПРІЗВИЩЕ, підпис)

«19» листопада 2024 р.

Вінниця – 2024 року

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Освітньо-кваліфікаційний рівень другий (магістерський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електромеханічні системи автоматизації та електропривод

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСЕЕМ

К.Т.Н., доц.

Микола МОШНОРІЗ

"17" вересня 2024 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Пустовіту Ярославу Валерійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Модернізація системи керування тягового електропривода локомотива

керівник роботи Грабко Валентин Володимирович к.т.н., доц. каф. КЕМСК
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
"17" вересня 2024 року № 310

2. Строки подання студентом роботи "30" листопада 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: використовуючи базу патентної інформації а також фахові наукові видання на основі аналізу обмежень, які притаманні існуючим електроприводам локомотивам, розробити математичну модель, структурні схеми та мікропроцесорну реалізацію пристрою, що дозволяє модернізувати електропривод стрічкового конвеєра.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

План підприємства із.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Грабо В.В., к.т.н., доц., каф. КЕМСК	27.08.24	29.08.24
Економічна частина	Шулле Ю.А., к.т.н., доц., каф. ЕСЕМ	27.08.24	19.09.24

7. Дата видачі завдання 27.08.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Приміт
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	27.08.2024р.	
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	26.10.2024р.	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	02.11.2024р.	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	08.11.2024р.	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	16.11.2024р.	
6	Попередній захист МКР	19.11.2024р.	
7	Нормоконтроль МКР	19.11.2024р.	
8	Рецензування МКР	07.12.2024р.	
9	Захист МКР	18.12.2024р.	

Студент Ачин
(підпис)

Пустовіт Я.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту [підпис]
(підпис)

Грабо В.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Пустовіт Я.В. Модернізація системи керування тягового електропривода локомотива. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електрична інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2023. – 98 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 25 назв; рис.:26; табл.:13

В даній магістерській кваліфікаційній роботі розраховано потужність тягового приводного двигуна, вибрано електричну машину – асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором. Здійснено перевірки за перегрівом та перевантажувальною здатністю. Також здійснено техніко-економічний розрахунок системи електропривода, за результатами розрахунку вибрано систему перетворювач частоти – асинхронний двигун. Розраховано та побудовано механічні характеристики для номінального режиму роботи. Було розроблено електричну принципову схему електропривода. Здійснено розрахунок динамічних режимів, система була перевірена на стійкість. Вимоги щодо безпечної експлуатації об'єкту розглянуті і вирішені у розділі «Охорона праці».

Ключові слова: електропривод, стрічковий конвеєр, система керування, контур швидкості та струму, регулятор, мікропроцесор.

ABSTRACT

Pustovit Ya.V. Modernization of the Control System of the Traction Electric Drive of a Locomotive. Master's qualification thesis in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics, educational program – Electrical Engineering. Vinnytsia: VNTU, 2023. – 98 p.

In Ukrainian. Bibliography: 25 sources; illustrations: 26; tables: 13

In this master's qualification thesis, the power of the traction drive motor was calculated, and the electric machine – an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor – was selected. Thermal and overload capability checks were carried out. A technical and economic calculation of the electric drive system was also performed, and based on the results, the frequency converter system – asynchronous motor – was chosen. Mechanical characteristics for the nominal operating mode were calculated and constructed. An electrical schematic diagram of the electric drive was developed. Dynamic modes were calculated, and the system was tested for stability. Requirements for the safe operation of the object were reviewed and resolved in the "Occupational Safety" section.

Keywords: electric drive, belt conveyor, control system, speed and current loops, regulator, microprocessor.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИРОБНИЧОГО МЕХАНІЗМУ І РЕЖИМИ ЙОГО РОБОТИ	9
1.1 Загальна інформація про локомотиви	9
1.2 Загальний аналіз електричної частини локомотива	11
1.3 Загальний аналіз тягового електроприводу локомотива.....	13
1.4 Вимоги до тягового електроприводу локомотива	16
2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЛОКОМОТИВА	20
2.1 Розрахунок потужності	20
2.2 Розрахункові дані для моделювання електромеханічних процесів електропривода	23
3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	26
3.1 Основні типи систем керування тягового електропривода локомотива	26
3.2 Розрахунок техніко-економічних показників СКЕП.....	26
4 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА ЙОГО ПЕРЕВІРКА.....	32
4.1 Вибір електродвигуна за потужністю і швидкістю обертання	32
4.2 Перевірка вибраного двигуна за нагрівом, перевантажувальною здатністю та умовами пуску	33
5 РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	35
5.1 Розрахунок випрямляча	35
5.2 Розрахунок автономного інвертора напруги	36
5.3 Розрахунок зарядного кола для заряду конденсаторів фільтра	36
5.4 Ємнісний фільтр	37
5.5 Розрахунок параметрів клампера	38
5.6 Розрахунок датчиків струму та напруги	39

6 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	41
6.1 Електрична схема та режими її роботи	41
6.2 Загальний аналіз систем керування ТЕП локомотива.....	43
6.3 Основні типи систем керування тягового електропривода локомотива	46
6.4 Аналітичний огляд різновидів алгоритмів керування.....	47
6.5 Класифікація систем керування асинхронними двигунами	50
7 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ САЕС ОПРИВОДА.....	52
7.1 Математична модель системи управління асинхронного двигуна в dq- координатах.....	52
7.2 Генерування завдання на момент	55
8 РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	58
8.1 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна	58
8.2 Побудова механічної характеристики.....	60
9 РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ. ОЦІНКА СТІЙКОСТІ	62
10 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	64
10.1 Визначення величини витрат запропонованого варіанту	64
10.2 Розрахунок експлуатаційних витрат.....	65
10.3 Розрахунок амортизаційних відрахувань.....	66
10.4 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу	66
10.5 Розрахунок витрат на силову електроенергію	68
10.6 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання	68
10.7 Інші витрати.....	70
11 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	71
11.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту.....	72
11.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць у приміщ. ТО	
11.1.2 Електробезпека.....	72
11.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	75
11.2.1 Мікроклімат	76
11.2.2 Склад повітря робочої зони	76

11.2.3 Виробниче освітлення	78
11.2.4 Виробничий шум	79
11.2.5 Виробничі вібрації.....	80
11.2.6 Психофізичні фактори.....	82
11.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи модернізованого тягового електропривода локомотива в умовах дії загрозливих чинників в надзвичайних ситуаціях.....	83
11.3.1 Дослідження стійкості роботи системи керування тягового електропривода локомотива в умовах дії іонізуючих випромінювань	85
ВИСНОВКИ	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	91
Додаток А (Обов'язковий) Технічне завдання	94
Додаток Б (Обов'язковий) Ілюстративна частина.....	98

ВСТУП

Актуальність. Залізничний транспорт відіграє ключову роль у транспортній системі України, а його технічний стан та розвиток безпосередньо впливають на економічну продуктивність та безпеку перевезень [1]. У сучасних умовах необхідно вирішити низку стратегічно значущих завдань, таких як створення енергоефективних і економічно обґрунтованих моделей тягового рухомого складу, підвищення рівня безпеки при високих швидкостях руху та вдосконалення інфраструктури для впровадження нових тягових одиниць.

Ефективність роботи тягового електропривода залежить від багатьох факторів, зокрема технічного стану обладнання, рівня підготовки персоналу, умов експлуатації та впливу зовнішнього середовища. У сучасних економічних умовах ключовим напрямом наукових досліджень є розробка та впровадження технологій модернізації, підвищення надійності та продовження ресурсу роботи існуючої техніки. Це сприятиме зменшенню енергетичних та ресурсних витрат. Використання сучасних інформаційних технологій дозволяє оптимізувати всі етапи життєвого циклу тягових електроприводів, забезпечуючи ефективне ресурсозбереження та адаптацію систем до змінних умов експлуатації.

У сучасних умовах розвитку залізничного транспорту значно зростає потреба у підвищенні ефективності та надійності роботи локомотивів. Одним із ключових елементів, що визначає продуктивність і економічність локомотивів, є тяговий електропривод та система його керування. Застарілі системи керування не завжди забезпечують достатню гнучкість та енергоефективність, що спонукає до їхньої модернізації з використанням сучасних технологій та алгоритмів керування [2].

Мета і завдання дослідження. Метою виконаного дослідження є підвищення ефективності та експлуатаційних характеристик електропривода локомотива шляхом використання тягових двигунів змінного струму та вдосконалення системи керування.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання:

– аналіз технічних і експлуатаційних характеристик об'єкта дослідження;

- виконання розрахунків для вибору оптимальної потужності двигунів та побудови навантажувальних діаграм;
- обґрунтування економічної доцільності модернізації системи електропривода;
- вибір сучасної мікропроцесорної системи керування на заміну застарілої релейної;
- моделювання поведінки системи для перевірки її адекватності;
- розрахунок ефективності капіталовкладень у модернізацію та розробка рекомендацій щодо забезпечення безпеки роботи персоналу в промислових умовах.

Об'єкт дослідження – процес контролю керування системою електропривода.

Предмет дослідження – системи керування тяговим електроприводом.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань і оцінки прийнятих технічних та алгоритмічних рішень було застосовано такі методи досліджень: методи технічної діагностики, обчислювальна математика та комп'ютерне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

В роботі отримані наступні результати:

- Удосконалено математичну модель керування тяговим електроприводом, орієнтовану на систему з частотним перетворювачем та асинхронним двигуном. Модель забезпечує гнучке налаштування під різні умови експлуатації, що дозволяє значно розширити сферу її застосування для сучасних систем керування.
- Розроблено методику моніторингу та контролю параметрів тягового електропривода. Вона дозволяє швидко виявляти та усувати недоліки системи, а також забезпечує ефективний контроль і аналіз вимірюваних параметрів для оцінки стану об'єкта керування.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці на основі математичної моделі структурних схем систем керування тяговим електроприводом локомотива, що працює з частотним перетворювачем і асинхронним двигуном, із використанням сучасної промислової елементної бази.

Впровадження таких пристроїв забезпечує підвищення ефективності, надійності та якості керування локомотивами, а також покращує безпеку експлуатації електричних мереж завдяки більш досконалому контролю та стабільності роботи системи.

Достовірність теоретичних положень магістерської кваліфікаційної роботи підтверджується коректним застосуванням математичного апарату, за допомогою якого здійснювався розрахунок та налаштування системи керування електроприводом.

Особистий внесок здобувача. Основні результати формулювання відповідних висновків отримані автором самостійно.

1 КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИРОБНИЧОГО МЕХАНІЗМУ І РЕЖИМИ ЙОГО РОБОТИ

1.1 Загальна інформація про локомотиви

Локомотив – це окремий транспортний засіб, який самостійно не перевозить пасажирів або вантаж, а тягне за собою вагони які не обладнані власними тяговими системами. Локомотив може бути електричним, тепловозним чи навіть паровим. Він має потужні тягові електродвигуни і призначений для перевезення на дальні відстані.

На рисунку 1.1 показано класифікацію типів тягових передач залежно від джерела енергії, що використовується у тяговому рухомому складі (ТРС).

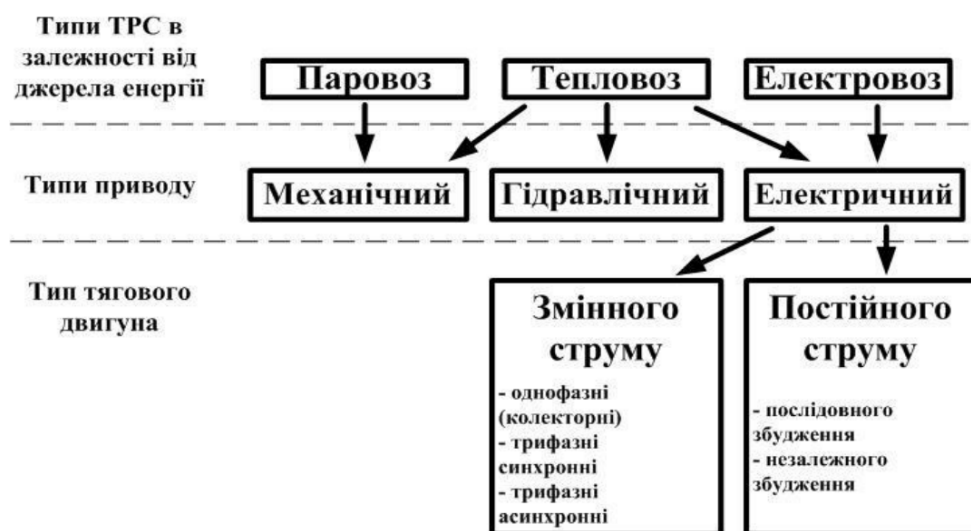


Рисунок 1.1 – Типи джерела енергії ТРС

Основні види локомотивів:

1. Паротяги: Використовувалися з XIX ст. і до середини XX ст.. Джерело енергії – паровий котел, що працює на вугіллі або мазуті. Сьогодні майже не використовуються через низьку ефективність та складність обслуговування.

2. Тепловози: Мають дизельний двигун, який виробляє енергію, необхідну для руху. Дизельний двигун може приводити колеса напряму (механічний привід) або через генератор, що живить електродвигуни (дизель-електричний привід).

Використовуються в місцях, де відсутня електрифікація колій. Переваги: незалежність від електромережі, надійність.

3. Електровози: Працюють за рахунок електроенергії, яку отримують із контактної мережі. В електровозі електроенергія надходить до тягових електродвигунів, які обертають колісні пари. Мають високу ефективність, менше забруднюють довкілля, ніж тепловози. Використовуються в електрифікованих зонах, зокрема на основних пасажирських і вантажних лініях.

Основні компоненти електровоза (рис. 1.1):

- Рама та кузов: Міцна конструкція, яка витримує великі навантаження і захищає обладнання;
- Система тягового приводу: Основний елемент для перетворення енергії на рух. Включає електродвигуни, дизельний двигун;

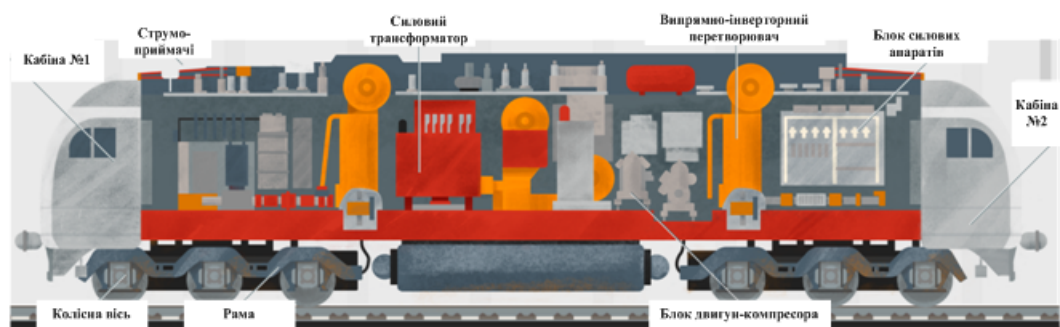


Рисунок 1.1 – Схема основних компонентів електровоза

- Тягові електродвигуни, які передають тягову силу на колісні пари;
- Передача тяги: Редуктори і передачі, які з'єднують двигуни з колесами і забезпечують оптимальний обертальний момент.
- Система гальмування: Використовує пневматичні гальма та, в деяких випадках, рекуперативне гальмування, що повертає частину енергії назад у мережу або батареї;
- Кабіна машиніста: Місце для управління локомотивом, обладнане всіма необхідними приладами для контролю та безпеки.

Локомотиви використовуються в багатьох сферах:

Пасажирські перевезення: забезпечують перевезення на великих швидкостях;

Вантажні перевезення: призначені для важких і довгих вантажних складів;

Спеціальні поїзди: обслуговування інфраструктури, ремонтні поїзди, снігоприбиральні локомотиви тощо.

Локомотиви залишаються важливим транспортним засобом у світі завдяки своїй ефективності, можливості перевезення великих обсягів вантажу і відносно низьким експлуатаційним витратам на одиницю перевезеної маси. Локомотиви є одним із ключових елементів залізничного транспорту, і їх розвиток має важливе значення для підвищення ефективності перевезень.

1.2 Загальний аналіз електричної частини локомотива

Електрична частина локомотива складається з ключових компонентів, таких як тягові електродвигуни (ТЕД), перетворювачі струму I і напруги U , пристрої для живлення двигунів і допоміжних пристроїв, апарати управління, допоміжне обладнання, струмопровідні системи та освітлювальні й вимірювальні прилади.

Локомотивне струмопровідне обладнання, розташоване на платформі даху або капотах локомотива, виконує функцію підключення електричних систем до контактної мережі для отримання енергії, необхідної для роботи локомотива, а також підведення живлення до інших електричних пристроїв [22].



Рисунок 1.2 – Пантограф та інше електрообладнання на даху локомотива

Передача енергії, в системі живлення локомотива, здійснюється від струмоприймача до електричних систем локомотива, які приєднані через струмопровідні шини та прохідні ізолятори, які забезпечують надійне з'єднання і ізоляцію високовольних ланцюгів. На даху локомотива також розташовуються комутаційні апарати, зокрема головні силові вимикачі (які задіяні для відключення ланцюгів на локомотивах, що працюють на змінному струмі), перемикачі положів струму (використовуються на багатосистемних локомотивах) та роз'єднувачі, що дозволяють вимикати несправні струмоприймачі.

Система передачі струму працює за такою схемою: енергія надходить від контактної електромережі через струмоприймач, далі через струмопровідні шини, захисні пристрої та комутаційні апарати. Після цього вона подається на перетворювачі та регулятори, а звідти – на тягові електродвигуни (ТЕД) або допоміжні машини. Завершальний етап – проходження струму через колісні пари на рейковий ланцюг.

Перетворювачі енергії виконують ключову функцію – вони трансформують струм і знижують напругу контактної мережі до необхідних значень для живлення ТЕД, допоміжного обладнання та інших електричних ланцюгів локомотива.



Трансформатор
електровоза зі знятим
захисним кожухом



Діодна випрямна
установка електровозу



Перетворювач частоти та
числа фаз для допоміжних
ланцюгів електровоза

Рисунок 1.3 – Перетворювачі електричної енергії локомотива

На локомотивах змінного струму основну функцію зниження вхідної високої напруги виконує тяговий трансформатор, який забезпечує живлення силової

електричної системи. Для перетворення змінного струму в постійний використовуються випрямлювальні установки та згладжувальні реактори, що мінімізують пульсації струму. У випадках, коли необхідно живити допоміжні машини, можуть застосовуватися статичні перетворювачі, які забезпечують потрібні параметри напруги та струму.

На локомотивах із асинхронним електроприводом встановлюються тягові інвертори, які виконують зворотне перетворення постійного струму в змінний струм із регульованими значеннями напруги та частоти для живлення тягових електродвигунів (ТЕД).

Комутаційне обладнання включає індивідуальні та групові контактори, які здійснюють перемикання у силових ланцюгах і допоміжних системах. Вони відповідають за включення/вимкнення ТЕД та допоміжних агрегатів, а також регулюють напрямок і швидкість обертання двигунів. Управління комутаційними апаратами здійснюється за допомогою дистанційних пристроїв, які встановлені у кабіні локомотива. Під дією машиніста ці пристрої активують відповідні приводи, що забезпечують точне регулювання роботи двигунів та допоміжного обладнання.

1.3 Загальний аналіз тягового електроприводу локомотива

Тяговий електропривод локомотива (ТЕПЛ) – це комплекс механізмів і систем, який перетворює електричну енергію на механічну для руху локомотива. Основне призначення тягового електроприводу – передача тягової сили від двигунів на колісні пари локомотива.

ТЕПЛ складається з таких основних елементів:

Система живлення – забезпечує подачу електроенергії до двигунів, яка може надходити від контактної мережі або акумуляторних батарей (у випадку гібридних або автономних електровозів):

Перетворювачі струму – перетворюють змінний струм із контактної мережі на постійний (чи навпаки), щоб він відповідав характеристикам двигунів.

Тяговий перетворювач – це пристрій, що регулює параметри струму (напругу та частоту) для оптимальної роботи двигунів. Для цього використовуються інвертори, випрямлячі або інші електронні схеми.

Передача тяги – механічна передача, яка передає обертовий момент від двигуна на колісні пари. Існує кілька типів передач:

Косозубі шестерні – передача крутного моменту безпосередньо на колеса.

Редуктори – регулюють швидкість обертання осей.

Тяговий електродвигун (ТЕД) - електричний двигун, призначений для приведення в рух транспортних засобів [1]. Це основний компонент ЕП, який безпосередньо здійснює перетворення електричної енергії в механічну.

Тягові електродвигуни локомотива зазвичай розташовані безпосередньо біля колісних пар, тобто на візках (ходових частинах) локомотива. Вони прикріплені до колісної пари через редукторну передачу, яка забезпечує передачу обертового моменту від електродвигуна до коліс, що приводить локомотив у рух.

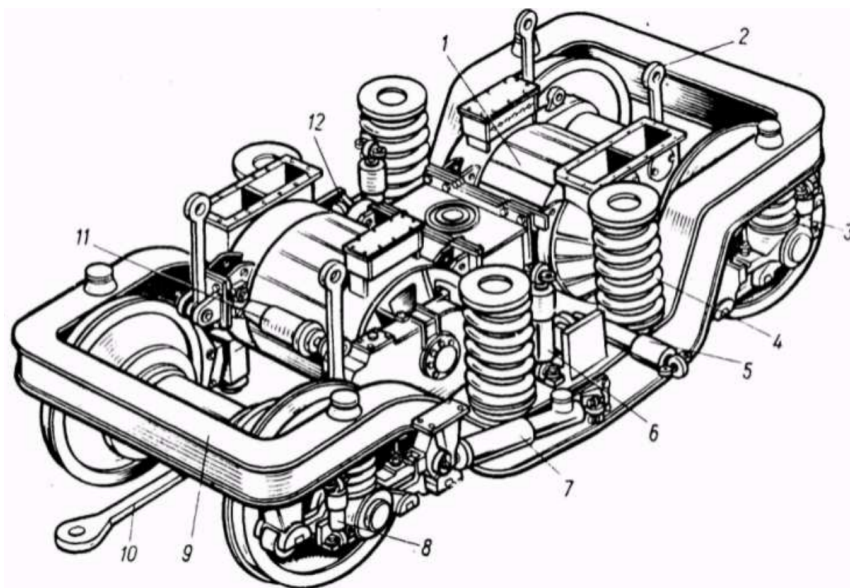


Рисунок 1.4 – Візок локомотива: 1 – ТЕД (два на кожну пару коліс візка); 2 – підвіска моторно редукторної системи; 3, 4 – пружини; 5, 6 – гідравлічні компенсатори-гасителі коливань кузова; 7, 8 – гідравлічні компенсатори-гасителі коливань візка; 9 – вал тягової муфти; 10 – брус; 11 – пружний механізм; 12 – упор пневмобалона

Основні типи тягових електроприводів:

- Постійного струму – використовується на електровозах, які живляться від мережі постійного струму. Характеризується застосуванням колекторних двигунів;
- Змінного струму – живиться від мережі змінного струму, використовує асинхронні двигуни і частотно-регульовані перетворювачі;
- Комбінований – може працювати від змінного та постійного струму.

Кожен тип електричної машини має свої особливості експлуатації та системи регулювання, що визначають ефективність їх використання в тягових електроприводах:

Машини постійного струму:

Регулювання здійснюється шляхом зміни напруги, що подається на тяговий електродвигун (ТЕД).

Додатково відбувається регулювання магнітного потоку шляхом зміни струму у обмотках збудження. Це дозволяє регулювати швидкість і крутний момент.

Машини змінного струму:

Управління реалізується шляхом зміни амплітуди та частоти напруги, що подається на двигун.

На рис. 1.6 наведено класифікацію електричних рухомих складів (ЕРС) залежно від типу перетворювача та тягового електродвигуна.

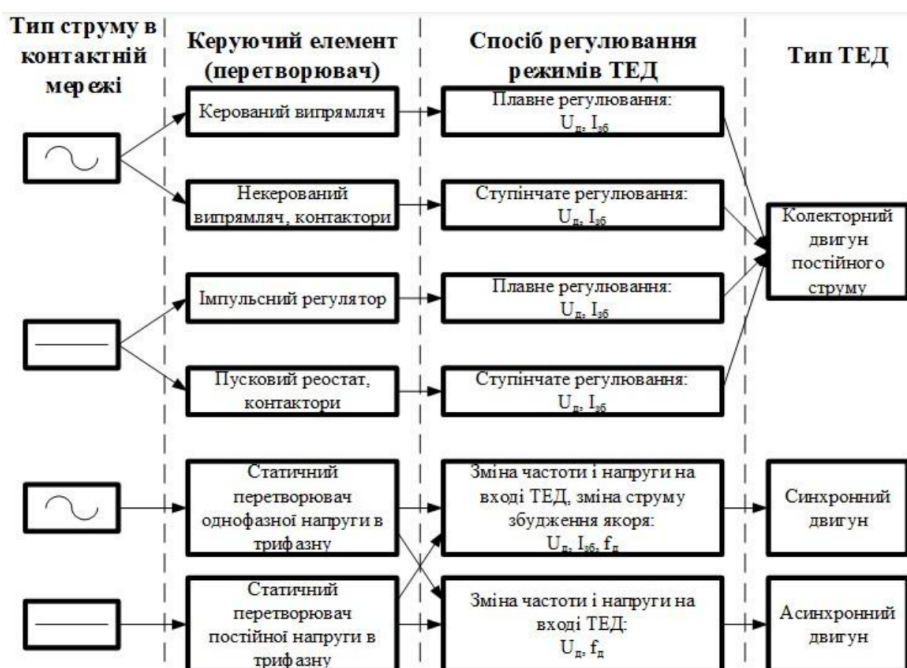


Рисунок 1.6 – Класифікація ЕРС залежно від типу перетворювача та ТЕД

Ця класифікація відображає технологічні особливості і тип систем управління для різних машин, що дозволяє оптимально застосовувати їх у транспортних системах.

На рис. 1.7 зображено кінематичну схему колісної пари локомотива з ТЕД.

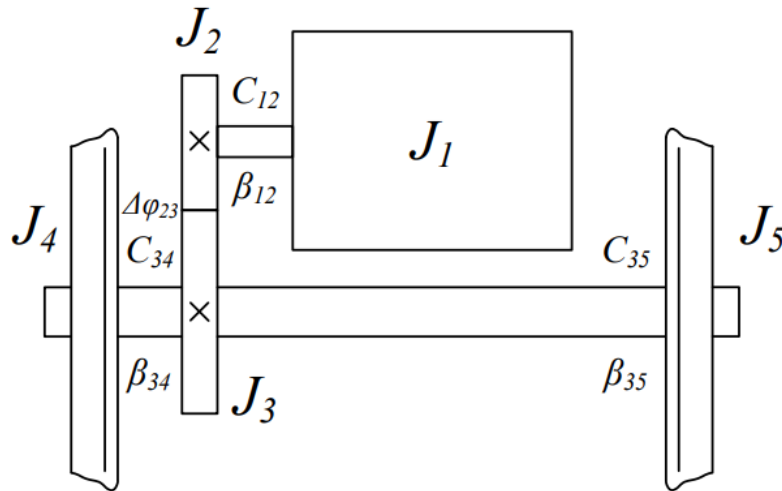


Рисунок 1.7 – Кінематична схема колісної пари локомотива

Сучасні тягові електроприводи дозволяють підвищити ефективність локомотива, зменшити енергоспоживання і збільшити надійність та довговічність обладнання.

1.4 Вимоги до тягового електроприводу локомотива

Основна відмінність тягових електродвигунів (ТЕД) від стаціонарних електродвигунів великої потужності полягає у специфічних умовах їх використання та конструктивних обмеженнях.

Умови монтажу та простір:

ТЕД встановлюються у обмеженому просторі під кузовом локомотива або всередині візка, що вимагає компактної конструкції та спеціальних кріплень.

Режими роботи:

На відміну від електродвигунів загального призначення, ТЕД функціонують у динамічних режимах: короткочасні, повторно-короткочасні роботи з частими пусками та зупинками.

Частота обертання ротора і струмові навантаження змінюються в широкому діапазоні: при русанні з місця струм може перевищувати номінальний у два рази.

Експлуатаційні навантаження:

ТЕД працюють у жорстких умовах з частими:

механічними навантаженнями: вібрація, тряска, поштовхи;

тепловими навантаженнями: різкі зміни температури через коливання навантажень;

електричними навантаженнями: стрибки струму і напруги.

Конструктивні особливості:

Підвищені вимоги до міцності: деталі та вузли ТЕД мають підвищену механічну міцність.

Ізоляція: застосовується теплостійка та вологостійка ізоляція для обмоток та струмопровідних частин.

Забезпечення стійкої комутації при різких змінах режимів роботи.

Ці фактори обумовлюють спеціальну конструкцію та технічні вимоги до ТЕД, що забезпечують їх надійну роботу у складних умовах експлуатації локомотивів.

Додаткові характеристики тягових електродвигунів:

- Стартовий момент: Тягові двигуни повинні забезпечувати високий стартовий момент, щоб зрушити важкі потяги з місця. Асинхронні та синхронні двигуни з інверторним керуванням добре справляються з цим завданням;

- Система охолодження: Тягові двигуни працюють при великих навантаженнях і потребують ефективної системи охолодження. Часто використовується повітряне або рідинне охолодження для уникнення перегріву;

- Рекуперація енергії: Багато тягових двигунів підтримують рекуперативне гальмування, яке дозволяє їм працювати як генератори під час гальмування, повертаючи частину енергії до мережі або в акумуляторні батареї. Це підвищує енергоефективність та зменшує витрати на експлуатацію.

Тяговий електропривод локомотива має певні вимоги, які забезпечують ефективну роботу, надійність та безпеку при русі по залізничних коліях. Основні вимоги до тягового електроприводу локомотива:

Висока потужність: Тяговий електропривод повинен забезпечувати достатню потужність для розгону та утримання локомотива на різних швидкостях, особливо при великих навантаженнях.

Висока ефективність: Система має бути економною в енергоспоживанні, щоб знизити витрати на електроенергію та зберігати працездатність при великих навантаженнях.

Регульованість швидкості та крутного моменту: Важливо, щоб електропривод забезпечував плавний розгін та гальмування, можливість регулювання швидкості та крутного моменту для різних умов роботи.

Надійність та довговічність: Тяговий електропривод має працювати на протязі тривалого часу без частих поломок, з високим рівнем надійності в умовах екстремальних температур та вібрацій.

Інтеграція з електронними системами управління: Локомотиви зазвичай оснащуються автоматичними системами контролю та моніторингу, тому привід має бути сумісний із такими системами для забезпечення ефективного керування і безпеки.

Здатність працювати в різних кліматичних умовах: Тяговий привід повинен бути здатний працювати при дуже низьких чи високих температурах, у вологих чи пилових умовах, без втрати працездатності.

Мінімальний рівень шуму та вібрацій: Для зниження рівня шуму та вібрацій при русі необхідно використовувати високоякісні матеріали та конструкції, що сприяють зниженню динамічних навантажень.

Екологічність: Сучасні локомотиви повинні відповідати стандартам екологічної безпеки, тому тяговий привід повинен мати низький рівень шкідливих викидів та споживання енергії.

Можливість реверсування руху: Тяговий привід має можливість швидко змінювати напрямок руху локомотива без значних затримок і втрат потужності.

Ці вимоги забезпечують безперебійну роботу локомотива, забезпечують ефективність його використання та гарантують безпеку пасажирів і вантажів.

Висновок по розділу 1

У цьому розділі представлено загальну класифікацію локомотивів за їх типом роботи та типом двигунів, що дозволяє систематизувати різновиди рухомого складу залежно від джерела енергії та конструктивних особливостей. Описано основні складові системи електропостачання та керування двигунами, включно з їхнім призначенням і роллю у забезпеченні функціонування локомотива.

Окремо проаналізовано режими роботи тягових електродвигунів (ТЕД), акцентуючи увагу на специфічних умовах їхньої експлуатації, таких як обмежений простір монтажу, часті пуски, механічні навантаження та температурні коливання. З урахуванням цих особливостей було подано класифікацію ТЕД та детально розглянуто їхні конструктивні характеристики, які забезпечують надійність і ефективність роботи електропривода у складних умовах експлуатації.

Аналіз потужності та особливостей роботи тягового електроприводу показав, що сучасні вантажні електровози потребують високих значень тягової потужності для забезпечення оптимальної продуктивності та ефективного транспортування вантажів на значні відстані. Проведені розрахунки дозволяють уточнити вимоги до потужності залежно від робочих умов.

Сформульовані вимоги до електроприводу локомотива, систем автоматичного керування та автоматизації.

В цілому впровадження сучасних технологій в тягові електроприводи сприяє підвищенню їх продуктивності, ефективності та надійності. Математичні моделі управління є важливим інструментом для оптимізації роботи тягових систем, що дозволяє адаптувати їх до змінних робочих умов та досягати високої економічної ефективності.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЛОКОМОТИВА

2.1 Розрахунок потужності

Для проведення розрахунків розглянемо основні параметри магістрального пасажирського електровоза змінного струму. Локомотив має зчіпну масу $m=100\text{т}$, конструкційну швидкість $v=100\text{км/год}$, максимальну швидкість $v_{\max}=160\text{км/год}$, та чотири приводні осі (відповідно, чотири тягові електродвигуни).

Початкові ділянки тягових характеристик мають максимальну силу тяги, як правило, дана сила тяги обмежується коефіцієнтом зчеплення Ψ між колесами та рейкою, що визначає величину зчеплення $P_{\text{сц}}$. Значення Ψ залежить від типу локомотива, умов експлуатації та може бути визначене за відповідною формулою.

$$\psi = \alpha_{\psi} + \frac{b_{\psi}}{c_{\psi} + d_{\psi} \cdot v} - e_{\psi} \cdot v. \quad (2.1)$$

Для нульової швидкості: $\Psi = 0,36$, для швидкості 100 км/год: $\Psi = 0,226$.

Величина дотичної сили тяги локомотива F_k [Н] на ділянках обмежених по зчепленню визначається за формулою:

$$F_k = P_{\text{сц}} \cdot \Psi. \quad (2.2)$$

де $F_k = 342$ кН для нульової швидкості, $F_k = 226$ кН для швидкості 100 км/год.

$P_{\text{сц}}$ – зчіпна вага локомотива, Н; Ψ – коефіцієнт зчеплення.

У процесі руху поїзда на нього діють зовнішні сили, які визначають характер його поступального руху. Основними силами є:

Дотична сила тяги (F_m) – це сила, що створюється тяговими електродвигунами локомотива для приведення поїзда в рух та подолання сил опору.

Гальмівна сила (B) – виникає при застосуванні гальмівних систем для зменшення швидкості або зупинки поїзда.

Сили опору руху (W) – це сукупність сил, що протидіють руху поїзда. До них належать:

Опір коченню через тертя між колесами і рейками.

Аеродинамічний опір – опір повітря, який збільшується із зростанням швидкості руху.

Додаткові опори – наприклад, опір при русі на ухилах або через кривизну колії.

Як показано на рисунку 2.1, внутрішні сили системи (наприклад, сили, що діють між вагонами) врівноважуються і не впливають на загальний рух поїзда. Натомість баланс зовнішніх сил визначає динаміку руху: прискорення або гальмування залежно від переважання сили тяги чи гальмівної сили над силами опору.

Ці сили враховуються при розробці систем управління тяговими двигунами та оптимізації роботи локомотива для підвищення ефективності руху та зменшення енергоспоживання.

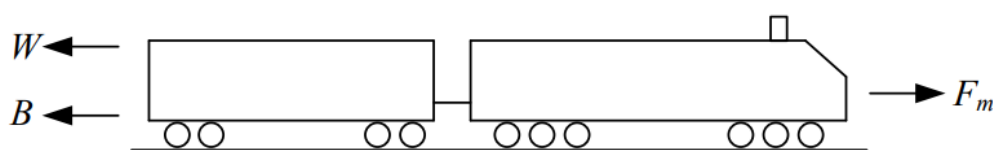


Рисунок 2.1 – Сили, що діють на поїзд у процесі його руху

Для досягнення необхідної тягової сили обирається асинхронний тяговий електродвигун СТА-1200У1 з короткозамкненим ротором, технічні характеристики якого наведені нижче:

Номінальна потужність одного ТЕД: 1200 кВт;

Число: фаз статора: 3;

пар полюсів: 3;

Частота мережі під'єднання струмоприймача локомотива: 56,9 Гц;

Величина номінальної фазної напруги живлення: 1080 В;

Синхронна швидкість обертання: 1138 об/хв;

Номінальний момент на валу ТЕД: 10 070 Нм;

Сковзання при номінальному режимі ТЕД: 0,01;

Фазний струм статора: 465 А;

Коефіцієнт потужності: 0,833;

Коефіцієнт корисної дії: 0,955.

Тяговий електропривод СТА-1200У1 є сучасною системою, призначеною для забезпечення ефективного керування рухомими складовими залізничного або іншого тягового транспорту. Цей привід характеризується високою надійністю, енергоефективністю та адаптивністю до різних умов експлуатації. Завдяки застосуванню потужних напівпровідникових компонентів та інноваційних систем керування, СТА-1200У1 забезпечує плавність ходу, точність регулювання швидкості та зменшення споживання енергії. Крім того, привід відзначається стійкістю до впливу зовнішніх факторів, що робить його ідеальним вибором для інтенсивної експлуатації в складних кліматичних умовах.

Передаточне число тягового редуктора визначається на основі обраного типу ТЕД та розрахунку діаметра ведучих коліс. Воно обчислюється відповідно до умови забезпечення заданої швидкості локомотива за такою формулою:

$$\mu = \frac{F \cdot D_K}{2M} = \frac{56,5 \cdot 1,25}{2 \cdot 10,07} = 3,5. \quad (2.3)$$

де F – величина тривалої сили тяги для одного колісно-моторного блоку візка локомотива, кН;

D_K – значення діаметра колеса, м;

M – тривалий момент який виникає на валу тягового електродвигуна, кНм.

Величина тривалої сили тяги для одного колісно-моторного блоку візка локомотива визначається з виразу:

$$F = \frac{F_{KP}}{n} = \frac{226}{4} = 85,5. \quad (2.4)$$

де F_{KP} - розрахункова сила тяги, кН;

n – кількість ТЕД.

Застосування електронно-обчислювальних машин (ЕОМ) у розв'язанні задач тягових розрахунків значно спрощує виконання складних і трудомістких обчислень. Використання ЕОМ дозволяє:

Знизити трудомісткість розрахунків – заміна ручного обчислення автоматизованими алгоритмами значно прискорює процес отримання результатів.

Підвищити точність обчислень – комп'ютерні програми зводять до мінімуму ймовірність помилок, які можуть виникати при ручних обчисленнях.

Розширити обсяги розв'язуваних задач – завдяки швидкості та обчислювальній потужності ЕОМ можна проводити аналіз складних систем і вирішувати більш обширні завдання.

Таким чином, використання ЕОМ є необхідним для оптимізації тягових характеристик, виконання динамічного моделювання роботи локомотивів, а також для розрахунку режимів енергоспоживання та ефективності тягових систем. Це забезпечує можливість аналізу та прийняття технічно обґрунтованих рішень у реальному часі, що є важливим для розвитку сучасного залізничного транспорту.

2.2 Розрахункові дані для моделювання електромеханічних процесів електропривода

Кутова частота:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 56,9 = 357,51 \text{ (рад/с)}. \quad (2.5)$$

Швидкість неробочого ходу ТЕД:

$$\omega_{hx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{357,51}{3} = 119,171 \text{ (рад/с)}. \quad (2.6)$$

Номінальна швидкість ТЕД:

$$\omega_n = \omega_{hx} (1 - s_n) = 119,17(1 - 0,01) = 117,979 \text{ (рад/с)}. \quad (2.7)$$

Номінальна швидкість ТЕД в обертах за секунду:

$$n_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{117,979}{6,28} = 18,777 \text{ (об/с)}. \quad (2.8)$$

При номінальній частоті обертання швидкість самого локомотива буде складати:

$$v_n = \frac{n_n}{i_p} \Pi = \frac{18,777}{3,5} 3,95 = 21,19 \text{ (м / с)} = 76,28 \text{ (км / год)}. \quad (2.9)$$

де i_p - передатне число редуктора; $i_p = 3,5$;

Π – периметр колеса:

$$\Pi = \pi D = 3,14 \cdot 1,25 = 3,95 \text{ (м)}. \quad (2.10)$$

де D – діаметр колеса, $D = 1,25$ м.

Частота обертання ТЕД при максимальній швидкості руху локомотива:

$$\omega_{\max} = \omega_n \frac{v_n}{v_{\max}} = 117,97 \frac{120}{76,28} = 247,44 \text{ (рад/с)}. \quad (2.11)$$

де $v_{\max}$ – величина максимальної швидкості локомотиву $v_{\max} = 160$ км/год;

Момент інерції електровозу ($m_{\text{лок}} = 100$ т):

$$J_{\Pi} = m_{\text{ТР}} \frac{R^2}{i_p^2} = 100 \frac{1,25^2}{3,5^2} = 12,755 \text{ (тм}^2\text{)}. \quad (2.12)$$

Приведене значення моменту інерції локомотиву з 10 вагонами ($m_b = 600$ т):

$$J_{\Pi} = m_{\text{ТР}} \frac{R^2}{i_p^2} = 700 \frac{1,25^2}{3,5^2} = 89,285 \text{ (тм}^2\text{)}. \quad (2.13)$$

Приведене значення моменту інерції одного локомотиву на кожний ТЕД:

$$J'_{\Pi} \approx 3,188 \text{ (тм}^2\text{)}. \quad (2.14)$$

приведене значення моменту інерції електровозу з 10 вагонами ($m_n = 700$ т):

$$J'_{\Pi b} \approx 22,321 \text{ (тм}^2\text{)}. \quad (2.15)$$

Момент двигуна, який відповідає тяговій силі локомотиву $F_{\text{тяг}} = 226$ кН:

$$M_T = \frac{F_{\text{тяг}} \cdot D}{2 \cdot z \cdot i_p} = \frac{226 \cdot 1,25}{2 \cdot 4 \cdot 3,5} = 10,059 \text{ (кН} \cdot \text{м)}. \quad (2.16)$$

Питомий опір руху локомотива визначається за наступною формулою:

$$W'_0 = 9,81(a'_0 + b'_0 V + c'_0 V^2) = 9,81(2,75 + 0,08V + 0V^2). \quad (2.17)$$

Питомий опір руху для вагонів:

$$W''_0 = 9,81(a''_0 + b''_0 V + c''_0 V^2) = 9,81(3 + 0,1V + 0,0025V^2). \quad (2.18)$$

Навантажувальні діаграми характеризують залежність моменту потужності або струму, які розвиває електричний двигун від часу, і використовується для оцінки перевантажувальної здатності електричного двигуна.

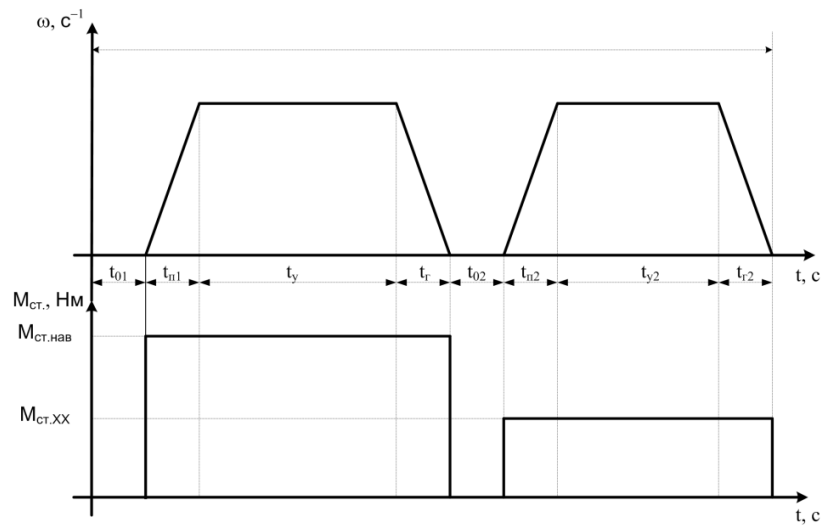


Рисунок 2.1 – Тахограма швидкості та діаграма навантаження

Повний опір руху рухомого складу:

$$W = PW'_0 + QW''_0. \quad (2.19)$$

Маса локомотиву та вагонів відповідно дорівнює $P=100$ т, $Q=600$ т.

Висновки: У цьому розділі виконано розрахунок зусиль, які діють на локомотив під час руху, зокрема, зусиль, що передаються на кожен з чотирьох тягових електродвигунів. На основі отриманих даних визначено потужність одного двигуна та обрано модель СТА-1200У1 як найбільш відповідну до заданих умов експлуатації.

Додатково виконано розрахунки моментів інерції рухомого складу та опору руху, що дозволяє врахувати динамічні характеристики локомотива в різних режимах роботи. Також були визначені основні параметри електродвигуна, які стануть базовими для подальшого моделювання системи тягового приводу.

Ці розрахунки створюють необхідну основу для аналізу і вдосконалення системи керування тяговим електроприводом, що буде розглянуто в наступних розділах.

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 Основні типи систем керування тягового електропривода локомотива

Типи систем керування тяговим електроприводом:

- Релейно-контакторні системи: Це застарілі системи керування, що використовують контактори та реле для перемикання режимів роботи. Вони характеризуються низькою ефективністю, складністю обслуговування та великим енергоспоживанням;

- Тиристорні системи: Використовуються в електровозах постійного струму. Застосування тиристорів дозволяє плавно змінювати силу струму, що проходить до тягових двигунів, і забезпечує краще регулювання швидкості;

- Системи з частотно-регульованими приводами (ЧРП): Найсучасніші системи керування, що дозволяють точно керувати швидкістю і потужністю завдяки перетворенню частоти струму. Вони забезпечують високу ефективність, точність і адаптивність до змінних умов експлуатації;

- Системи з асинхронними двигунами: Такі системи керування використовують асинхронні двигуни змінного струму, які мають високу надійність і низькі витрати на обслуговування. Завдяки інверторам з'являється можливість точного регулювання частоти обертання.

Загалом СКЕП забезпечує плавний та ефективний рух локомотива, дозволяючи розвивати високу потужність для перевезення важких вантажів або великої кількості пасажирів на довгі відстані.

3.2 Розрахунок техніко-економічних показників СКЕП

Більшість вимог до автоматизованого електроприводу можуть забезпечити такі системи:

1. Релейно контакторна система - двигун постійного струму (РКС-ДПС);

2. Тиристорний перетворювач - двигун постійного струму (ТП-ДПС);
3. Широтно імпульсний перетворювач - двигун постійного струму (ШП-ДПС);
4. Перетворювач частоти - асинхронний двигун (ПЧ-АДКР).

Для вибору електроприводу та його системи керування скористаємося методом приведених затрат, який полягає в розрахунку приведених річних затрат на придбання і обслуговування обладнання, в результаті чого по найменшому значенню цих затрат обирається економічно доцільніша система електропривода.

Приведені затрати визначаються за формулою:

$$З = E_n \cdot K + C, \quad (3.1)$$

де E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (приймається 0,17 для всіх галузей промисловості);

K – капітальні затрати, грн.;

C – собівартість, грн.;

$$K = D + CK, \quad (3.2)$$

де D – вартість двигуна, грн.;

CK – вартість системи керування, грн..

1. Релейно-контакторна система – двигун постійного струму (РКС-ДПС).

Модель двигуна: ДК-810А або ДК-806А.

Тип: Тяговий двигун постійного струму.

Потужність: до 1200 кВт (кілька двигунів на локомотиві).

Виробник: Харківський завод електромашин або аналоги.

Система керування: Релейно-контакторна система (РКС)

Використовує реле і контактори для регулювання напруги та струму на двигуні.

Система застаріла, але відносно проста та надійна.

2. Тиристорний перетворювач – двигун постійного струму (ТП-ДПС).

Модель двигуна: ДК-814 або ED-118А.

Тип: Тяговий двигун постійного струму.

Потужність: близько 1200 кВт (кілька двигунів у системі).

Особливості: Використовується для плавного регулювання тяги завдяки тиристорним перетворювачам.

Система керування: Тиристорний перетворювач.

Використовує силові тиристори для регулювання струму на двигуні.

Плавне регулювання швидкості та краща енергоефективність порівняно з РКС.

3. Широтно-імпульсний перетворювач – двигун постійного струму (ШП-ДПС).

Модель двигуна: ДК-814А або ДТК-1200.

Тип: Тяговий двигун постійного струму.

Потужність: до 1200 кВт.

Особливості: Високі показники ефективності з використанням ШП-керування.

Система керування: Широтно-імпульсний перетворювач (ШП).

Використовує ШІМ (широтно-імпульсну модуляцію) для регулювання напруги.

Зменшуються втрати енергії та покращується керованість двигуна.

4. Перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ-АДКР) для тягового електроприводу СТА-1200У1

Модель двигуна: СТА-1200У1.

Тип: Асинхронний тяговий двигун з короткозамкненим ротором.

Потужність: 1200 кВт.

Напруга: 3-фазна, 380–660 В.

Частота обертання: до 1500 об/хв (залежно від частоти живлення).

Виробник: "Електроважмаш" (Україна).

Особливості:

Висока надійність та ефективність.

Низькі експлуатаційні витрати.

Мінімальні витрати на технічне обслуговування.

Система керування: Перетворювач частоти (ПЧ).

Використовує частотне регулювання для керування швидкістю та моментом двигуна.

Основні параметри системи керування:

Тип перетворювача: Векторний інвертор з ШІМ-регулюванням.

Потужність: 1200–1500 кВт (залежно від завантаження).

ККД: до 98%.

Особливості:

Плавний пуск і зупинка двигуна.

Висока точність регулювання швидкості.

Зменшення витрат електроенергії до 10-15% у порівнянні зі старими системами.

Переваги для електроприводу СТА-1200У1:

Висока енергоефективність завдяки точному регулюванню частоти живлення.

Зменшення витрат на обслуговування за рахунок використання АД.

Покращена динаміка тяги та адаптація до різних режимів роботи.

Якщо потрібно детальні розрахунки витрат або характеристик для цієї системи – надайте уточнення!

Результати розрахунку приведених затрат для інших систем електропривода наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку приведених затрат систем електропривода

Показники	ТП-ДПС	ШП-ДПС	РКС-ДПС	ПЧ-АД
Розрахована Рн двигуна, кВт	1200	1200	1200	1200
Вартість двигуна (Д), грн.	1 300 000	1 250 000	1 400 000	1 300 000
Вартість системи керування (СК), грн.	1 500 000	1 400 000	1 600 000	1 600 000
Капіталовкладення $K = Д + СК$, грн.	2 800 000	2 650 000	3 000 000	2 900 000
Амортизаційні відрах., $Ca = Ea * K$, грн.	140 000	132 500	150 000	145 000
Eo	0,015	0,015	0,015	0,015
Витрати обслуг. і ремонт, $Co = Eo * K$, грн.	42 000	39 750	45 000	43 500
Витрати на електроенергію, грн.	450 000	440 000	460 000	400 000
Собівартість $C = Ca + Co + Cw$, грн.	632 000	612 250	655 000	588 500
Зведені витрати $Z = En * K + C$, грн.	1 932 000	1 857 500	2 055 000	1 835 500

Перетворювач частоти (інвертор) є ключовим елементом сучасної системи керування тягового локомотива, що дозволяє значно підвищити ефективність та надійність його роботи. Цей пристрій перетворює вхідну синусоїдну напругу сталої частоти на вихідну напругу змінної частоти та амплітуди, використовуючи широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ). У результаті формується синусоїдний струм в обмотках тягового АД, що забезпечує точне керування його роботою.

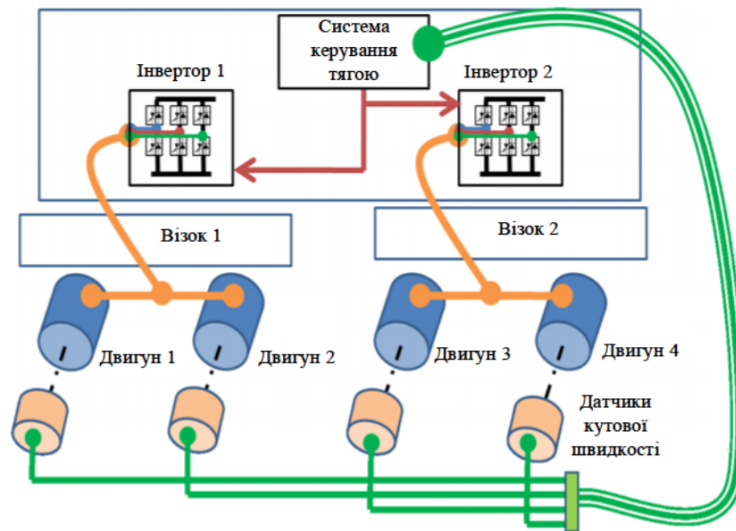


Рисунок 3.1 – Структура живлення тягових двигунів локомотива

Переваги застосування перетворювача частоти для тягових локомотивів:

Гнучке регулювання швидкості. Використання частотно-регульованого електроприводу дозволяє плавно змінювати швидкість обертання асинхронного двигуна, що є критично важливим для локомотивів, які працюють у різних режимах руху: від маневрових операцій до тривалих поїздок на високих швидкостях.

Підвищена енергоефективність. На відміну від застарілих систем регулювання швидкості, що використовують дроселювання або включення-виключення двигунів, перетворювач частоти дозволяє економити до 50% електроенергії. Це досягається за рахунок оптимізації продуктивності та частоти обертання двигунів.

Замкнені системи управління. Системи на основі перетворювача частоти забезпечують точну підтримку заданих технологічних параметрів, що особливо важливо для електроприводів, які працюють у постійно змінних умовах тягових навантажень.

Заміна приводів постійного струму. Перехід на асинхронні двигуни з перетворювачами частоти дозволяє знизити витрати на технічне обслуговування та ремонт, оскільки асинхронні двигуни мають менше зношуваних компонентів (наприклад, відсутність колекторів і щіток).

Підвищення надійності та ресурсу обладнання. Завдяки плавному регулюванню частоти обертання та зменшенню динамічних навантажень на механічні компоненти локомотива, знижується знос обладнання, що збільшує термін його служби.

Точність регулювання швидкості. Перетворювач частоти забезпечує високу точність регулювання швидкості руху локомотива, що є необхідним для стабільної роботи на маршрутах з різними умовами та навантаженнями.

Економічний ефект від впровадження ПЧ-АД на тягових локомотивах:

Суттєва економія електроенергії, що знижує експлуатаційні витрати.

Підвищення продуктивності локомотивів та якості перевезень завдяки оптимізації режимів роботи.

Зменшення зносу обладнання і подовження терміну його експлуатації через поліпшену динаміку роботи електропривода.

Доцільність використання ПЧ-АД на тягових локомотивах

Враховуючи перелічені переваги, перетворювач частоти у поєднанні з асинхронним двигуном є оптимальним рішенням для систем керування тяговим електроприводом. Це дозволяє підвищити ефективність, надійність і економічність локомотивів, забезпечуючи їхню відповідність сучасним вимогам залізничного транспорту.

Висновки. У цьому розділі здійснено техніко-економічний розрахунок різних систем електропривода, за результатами якого найекономічнішим варіантом виявилася система "перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ-АД)", оскільки вона забезпечує найнижчі зведені витрати та оптимальніші показники роботи електропривода.

4 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА ЙОГО ПЕРЕВІРКА

4.1 Вибір електродвигуна за потужністю і швидкістю обертання

Електродвигун обирається на основі заданої швидкості обертання та попередньо розрахованої потужності, що забезпечує відповідність вимогам до продуктивності та енергоефективності. Параметри обраного двигуна, які підтверджують його технічну доцільність та відповідність робочим умовам, наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри тягового асинхронного двигуна

Назва параметру	Величина
Тип двигуна	СТА-1200У1
Номінальна потужність	1200 кВт
Кількість фаз статора	$m = 3$
Число пар полюсів	$p = 3$
Умовно номінальна частота мережі	56,9 Гц
Номінальна фазна напруга	1080 В
Синхронна частота обертання	1138 об/хв
Номінальний момент на валу	10070 Нм
Сковзання в номінальному режимі роботи	0,01
Фазний струм статора в номінальному режимі (діюче значення)	465 А
Коефіцієнт потужності	0,833
Коефіцієнт корисної дії	0,955
Параметри схеми заміщення:	
Активний опір фази обмотки статора	0,033 Ом
Індуктивний опір фази обмотки статора	0,228 Ом
Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора	0,025 Ом
Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора	0,238 Ом
Індуктивний опір (гілки намагнічування)	5,392 Ом

Тяговий електропривод СТА-1200У1 є сучасною системою керування для електрорухомого складу, яка базується на використанні перетворювача частоти (ПЧ) в поєднанні з асинхронним двигуном. Така система забезпечує високу ефективність, надійність та точність керування тяговими характеристиками. Номінальна потужність електроприводу складає 1200 кВт, що відповідає вимогам до важких тягових навантажень.

Застосування перетворювача частоти дозволяє плавно регулювати швидкість обертання двигуна та момент на валу в широкому діапазоні, що є критично

важливим для оптимізації роботи локомотива під різними режимами навантаження. Завдяки відсутності колектора й щіток у асинхронних двигунах значно зменшуються витрати на обслуговування та підвищується їх довговічність.

Основними перевагами електроприводу СТА-1200У1 є:

Високий ККД системи завдяки ефективному регулюванню частоти обертання та мінімізації енергетичних втрат;

Точне керування швидкістю і моментом, що забезпечується за допомогою перетворювача частоти та системи керування;

Надійність і довговічність, обумовлені застосуванням асинхронного двигуна;

Економія електроенергії порівняно з традиційними системами тягового електроприводу;

Зниження експлуатаційних витрат, пов'язаних з обслуговуванням і ремонтом.

Таким чином, тяговий електропривод СТА-1200У1 є доцільним рішенням для сучасного електрорухомого складу завдяки своїй енергоефективності, економічності та відповідності високим вимогам до надійності й продуктивності.

4.2 Перевірка вибраного двигуна за нагрівом, перевантажувальною здатністю та умовами пуску

Перевіримо вибраний електродвигун по нагріву за методом еквівалентного моменту [11], що ґрунтується на пропорційній залежності еквівалентного моменту та кількості теплоти, яка виділяється в двигуні.

Еквівалентний момент двигуна:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum (M_i^2 \cdot t_i)}{t_{\text{ц}}}}. \quad (4.1)$$

$$M_{\text{екв}} = 10059 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Обчислюємо номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P}{n}. \quad (4.2)$$

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{1200000}{1138} = 10070,3 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Еквівалентний момент має бути меншим номінального:

$$M_{\text{НОМ}} > M_{\text{екв}}, \quad (4.3)$$

$$10070,3 \text{ (Н} \cdot \text{м)} > 10059 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Умова нагріву виконується, отже двигун обрано вірно.

Перевіримо електродвигун за умовою допустимого перевантаження. Повинна виконуватися умова:

$$\lambda \cdot M_{\text{НОМ}} > M_{\text{max}}, \quad (4.4)$$

де M_{max} – максимальний статичний момент на валу двигуна, $M_{\text{max}} = 715,857 \text{ Н} \cdot \text{м}$; – перевантажувальна здатність двигуна, ($\lambda = 2,5$).

$$M_{\text{max}} = \frac{F_k \cdot D}{2 \cdot z \cdot i_p} = \frac{342 \cdot 1,25}{2 \cdot 4 \cdot 3,5} = 15267,8 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (4.5)$$

$$2,5 \cdot 10070,3 = 25175,7 \text{ (Н} \cdot \text{м)} > 15267,8 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

За умовою допустимого короткочасного перевантаження двигун вибрано.

Висновок. Був вибраний тяговий асинхронний двигун типу СТА-1200У1 для системи електроприводу локомотива. Перевірка обраного двигуна за нагрівом і перевантаженням показала, що електродвигун вибрано вірно.

5 РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

5.1 Розрахунок випрямляча

Для вибору відповідних діодів випрямляча потрібно визначити діючий струм через діод, враховуючи коефіцієнт запасу, який приймається рівним 1,5.

Величина номінального випрямленого струму складе:

$$I_{dc} = \frac{k_z \cdot P_{2n}}{U_{DCn} \cdot \eta \cdot \eta_{inv}} = \frac{1.5 \cdot 1200000}{1527 \cdot 0,93 \cdot 0,96} = 1320,3 \text{ (A)}. \quad (5.1)$$

де U_{DCn} – номінальна випрямлена напруга;

P_{2n} – значення номінальної потужності ТЕД;

η_{inv} – ККД для перетворювача. Напруга для ланки постійного струму складає 1527 В.

Для вибору силових діодів і IGBT для автономних інверторів напруги необхідно, щоб їх гранично допустима величина зворотної напруги перевищувала максимальну напругу для ланки постійного струму, тобто: $U_{ce} > U_{DCmax}$.

Граничне значення напруги в ланці постійного струму сучасних перетворювачів обмежується максимально допустимою напругою електролітичних конденсаторів фільтра. Для перетворювачів, що працюють від трифазного живлення, це значення дорівнює 1700 В. $U_{grid} = 1080 \text{ В}$. $U_{ce} = 1700 \text{ В}$.

Сучасна промисловість випускає силові діоди та IGBT-транзистори зі стандартним рядом максимальних напруг колектор-емітер: 250, 600, 1200, 1700, 3300, 4500, 6500 В.

Вибір силових діодів можна виконати на веб-сайтах виробників, орієнтуючись на відповідні критерії: $I_{VD} > I_{max}$, $U_{VDmax} > U_{ce}$,

де I_{VD} та U_{VDmax} – Вибір здійснюється відповідно до тривалого струму діода та зворотної напруги, що зазначені в його паспортних характеристиках. Згідно з каталогом обрано діод Д253-1600-16 [21], основними параметрами якого є: $I_0 = 1600$ А, $U = 1700$ В.

5.2 Розрахунок автономного інвертора напруги

Значення амплітуди струму статора:

$$I_{na} = \sqrt{2}I_n = \sqrt{2} \cdot 465 = 657,5 \text{ (А)}. \quad (5.2)$$

Прийнявши перевантажувальну здатність 1,5 визначаємо величину максимального струму на виході перетворювача:

$$I_{max} = k_z \cdot I_{na} = 1,5 \cdot 657,5 = 986,3 \text{ (А)}. \quad (5.3)$$

Вибір IGBT транзистора здійснюється за такими критеріями:

$$I_C > I_{max}, U_{ce_{max}} > U_{ce}.$$

де I_C та $U_{ce_{max}}$ – тривалий струм колектора та напруга колектор-емітер, зазначені в паспортних даних IGBT, мають відповідати вимогам, причому обов'язковою є наявність антипаралельного діода, який зазвичай вбудований у корпус транзистора і не потребує додаткового розрахунку. Згідно з каталогом [22], обираємо IGBT-модуль типу CM1000DUC-34NF, основні параметри якого такі: $I_C = 1000$ А, $U_{ce} = 1700$ В.

5.3 Розрахунок зарядного кола для заряду конденсаторів фільтра

Для забезпечення заряджання конденсаторів фільтра з обмеженням струму при ввімкненні перетворювача в ланку постійного струму вводять резистор із шунтуючим ключем, а схема керування реле показана на рисунку 3.1 а.

Величина опору зарядного резистора:

$$R_4 = \frac{U_{dcn}}{I_{cmax}} = \frac{1700}{1000} = 1,7 \text{ (Ом)}. \quad (5.4)$$

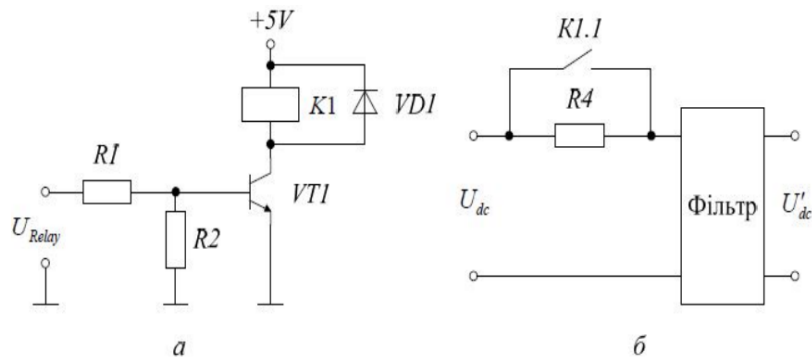


Рисунок 5.1 – Зарядне коло конденсаторів фільтра

По напрузі U_{KE} та по максимальному струму колектора, що відповідає пусковому струму реле $I_{kmax} = I_{РЕЛЕ\ ПУСК}$, з каталогу вибирається транзистор BSP52 [23] з параметрами $U_{co} = 80 \text{ В}$, $I_c = 1000 \text{ мА}$.

Реле K1 обирається відповідно до струму в ланці постійного струму, який становить 1185,95 А.

5.4 Ємнісний фільтр

Для зменшення пульсацій струму в лінії та захисту схеми від перенапруг у контактній мережі використовується індуктивно-ємнісний фільтр. Цей фільтр включає індуктивність LF і блок конденсаторів SA-SB.

Характеристики індуктивності:

Значення індуктивності – 1 мГн;

Струм у тривалому режимі – 500 А.

Характеристики блоку конденсаторів:

Сумарна ємність – 2200 мкФ;

Максимально допустима напруга – 2200 В;

Подвійна амплітуда пульсацій напруги – 50 В;

Частота пульсацій – 1 кГц.

Блок конденсаторів складається з елементів типу E50.R23-115N10, які мають такі параметри:

Номінальна ємність одного конденсатора – 1100 мкФ;

Номінальна напруга – 1100 В.

Кожен конденсатор у складі блоку шунтується резистором опором 40 кОм із потужністю 10 Вт.

5.5 Розрахунок параметрів клампера

Клампер, що включає резистор, діод і напівпровідниковий ключ (див. рис. 5.2), підключають паралельно до ланки постійного струму для відведення надлишкової енергії, яка утворюється під час гальмування привода. У підйомних механізмах гальмівні процеси, наприклад, при опусканні вантажу, часто супроводжуються рекуперацією енергії, яку клампер розсіює.

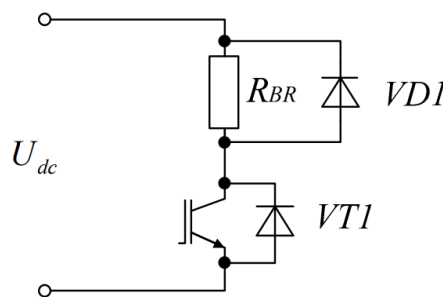


Рисунок 5.2 – Схема складових клампера

Ключ клампера вибирають залежно від величини струму, що протікає через нього у тривалому режимі роботи. У випадку, коли вся активна потужність під час роботи передається до ланки постійного струму, використовується така залежність:

$$I_{BR} = \frac{P_{2n}}{U_{DCn}} = \frac{1200000}{1700} = 705,9 \text{ (В)}. \quad (5.5)$$

Визначимо середнє значення потужності, яку потрібно розсіювати на резисторі клампера, враховуючи, що генераторний режим триває 25-30 % загального часу циклу:

$$P_{BR} = 0,3 \cdot P_{2n} = 0,3 \cdot 1200000 = 360000 \text{ (Вт)}. \quad (5.6)$$

Опір резистора необхідний для роботи клампера буде рівний:

$$R_{BR} = \frac{U_{DCmax}^2}{P_{BR}} = \frac{1700^2}{360000} = 8,03 \text{ (Ом)}. \quad (5.7)$$

де $U_{DCmax} = 1700 \text{ В}$ – максимальна величина напруги в ланці постійного струму.

Потужність буде знаходитися за виразом:

$$P = \frac{R_B}{T} \int_0^T I_R^2 dt. \text{ (Ом)}. \quad (5.8)$$

де I_R - струм резистора; T - час гальмування.

Для ефективного відведення потужності баластний резистор повинен бути сконструйований з вентилятором для примусового обдування.

5.6 Розрахунок датчиків струму та напруги

Датчики струму підбирають, виходячи з максимального струму, який необхідно вимірювати. Це означає, що їхній робочий діапазон має перевищувати гранично допустимий струм у системі. Для контролю струмів на виході перетворювача вибір датчика базується на його максимальному значенні.

Підібрати датчик струму можна на основі розрахованого значення струму I_{dc} на відповідному ресурсі. З урахуванням цього було обрано датчик SZ140-1200A [24], номінальний струм якого становить 1200 А.

Канал для вимірювання напруги ланки постійного струму будується із застосуванням датчика LV-25 Р. Згідно з технічною документацією цього датчика, максимальний струм у первинному колі $I_{p\max}$ дорівнює 14 мА. Тому значення опору резистора R_1 визначається за формулою:

$$R_1 = \frac{U_{dc\max}}{I_{p\max}} = \frac{1700}{0,014} = 121428,5 \text{ (Ом)}. \quad (5.9)$$

Зі стандартного ряду резисторів вибираємо $R_1 = 120 \text{ кОм}$.

Висновок. У цьому розділі було проведено розрахунок та вибір основних елементів силової частини електропривода для перетворювача частоти. Вибір силових діодів та IGBT-модулів здійснювався з урахуванням максимальних напруг і струмів, що виникають у системі, а також за критерієм їх тривалої та перевантажувальної здатності. Далі, для зарядного кола фільтра було розраховано опір резистора, а також вибрано відповідні транзистори і реле. Для зниження пульсацій струму та захисту від перенапруг було розраховано параметри індуктивно-ємнісного фільтра. Також було визначено параметри клампера для розсіювання надлишкової енергії у гальмівних режимах, а також вибрано датчики струму та напруги для вимірювання відповідних величин у системі.

6 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

6.1 Електрична схема та режими її роботи

Живлення АД здійснюється від частотного перетворювача, що включає випрямляч, фільтр постійного струму, інвертор та гальмівний переривник з резистором. Якщо тягова одиниця живиться від джерела постійної напруги, випрямляч не використовується, і джерело живлення підключається безпосередньо до вхідного інвертора, який може бути оснащений фільтром для покращення якості електричної енергії під час роботи напівпровідникових ключів.

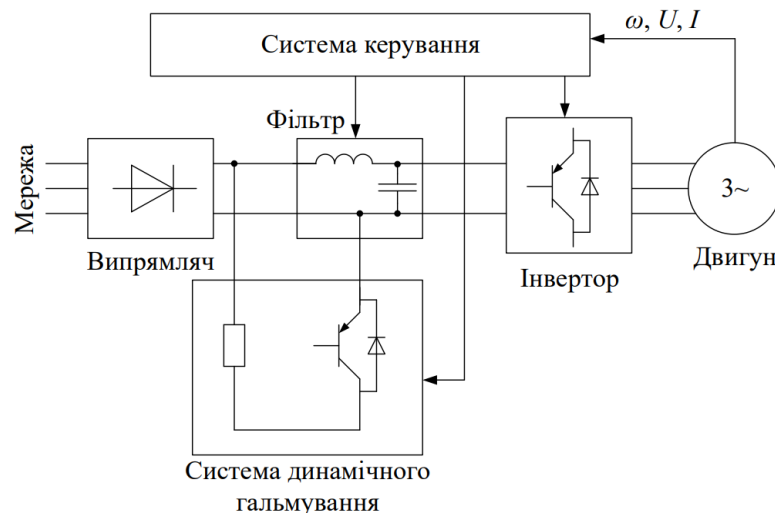


Рисунок 6.1 – Функціональна схема тягового асинхронного приводу

Тягове обладнання поїзда розташоване виключно у двох головних вагонах, обладнаних кабінами управління. Таке рішення дозволяє зменшити витрати та загальну вагу поїзда. У разі несправності тягового електрообладнання одного з вагонів рух можна продовжити, використовуючи 50% від номінальної тягової потужності.

На даху головного вагона встановлено два блоки гальмівних резисторів. Кожен блок містить по два резисторних модулі, які відповідають за роботу інверторів двигунів.

Інвертори, що забезпечують живлення тягових електродвигунів, розташовані в металевих шафах машинного відділення головного вагона. Вони поділені на дві групи для живлення електродвигунів переднього та заднього візків.

Схема електрична принципова тягового електроприводу локомотива на основі системи керування ПЧ-АДКР представлена на рисунку 6.2.

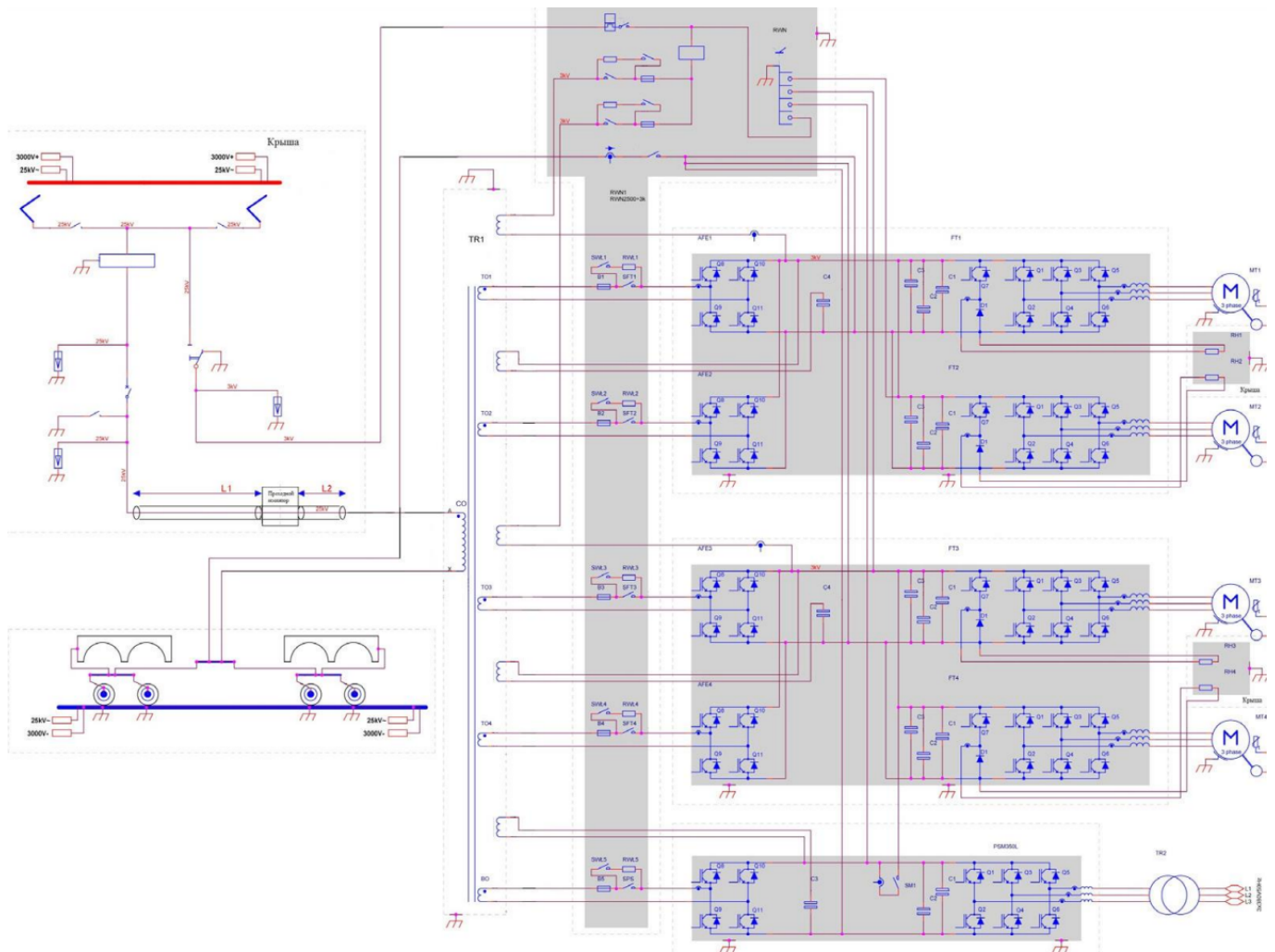


Рисунок 6.2 – Схема електрична принципова тягового електрообладнання

TR1 – головний тяговий трансформатор; CO – мережева обмотка цього трансформатора; TO1, TO2, TO3, TO4 – основні тягові обмотки трансформатора; BO – допоміжна обмотка трансформатора для додаткових завдань; RWN – високовольний розподільник; AFE – керовані випрямлячі; FT – інвертори для тягових систем; PSM350 – статичний перетворювач напруги; TR2 – трансформатор для власних потреб; MT – електродвигуни тяги; RH – резистори для гальмівних систем.

6.2 Загальний аналіз систем керування тягового електропривода локомотива

Система керування тягового електроприводу (СКТЕП) – це комплекс обладнання та програмного забезпечення, який забезпечує ефективне управління електроприводами, що відповідають за рух локомотива.

СКТЕП локомотива мають велике значення для забезпечення надійності, економічності та ефективності роботи локомотивів. Вони призначені для оптимізації управління енергоспоживанням, забезпечення плавного розгону та гальмування, а також підтримки стабільної швидкості і потужності. Загальний аналіз систем керування тягового електроприводу включає розгляд їх основних компонентів, функцій та типів систем, що використовуються.

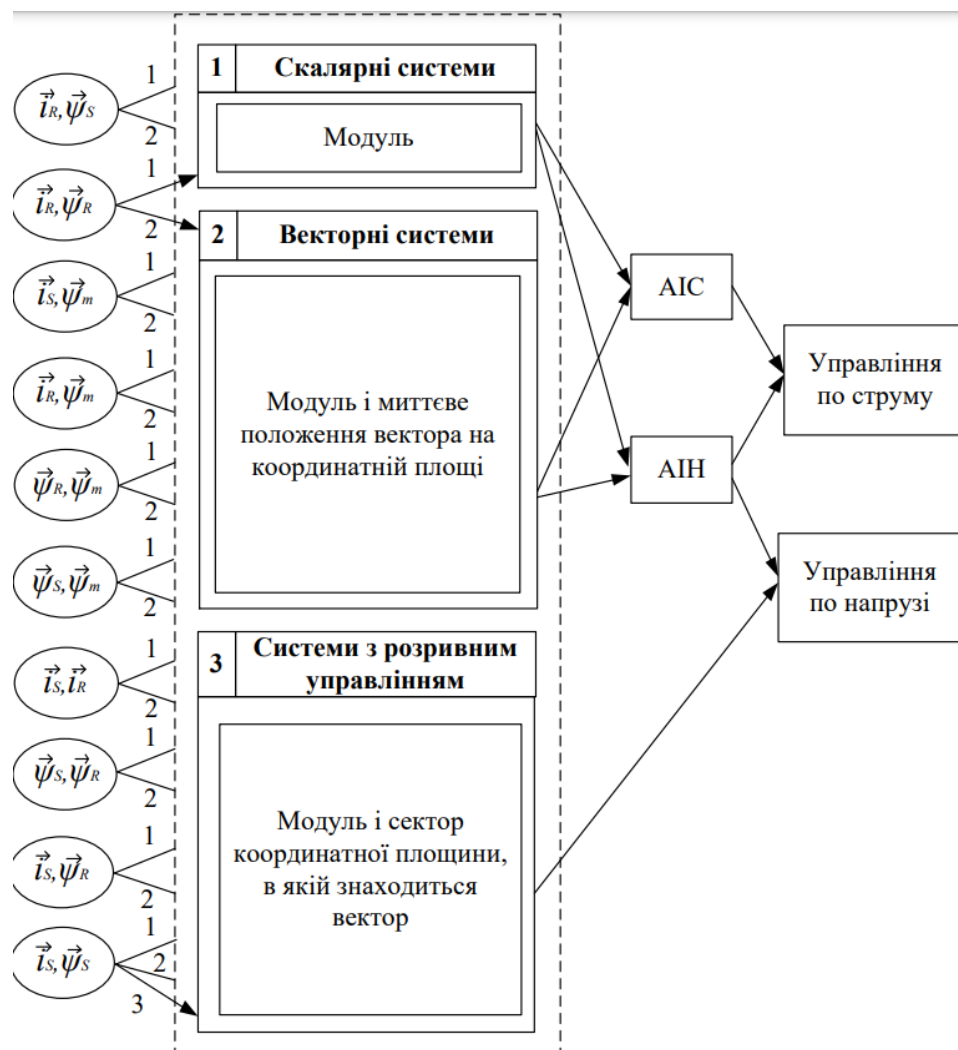


Рисунок 6.3 – Класифікація систем керування асинхронними двигунами

1. Компоненти систем керування тяговим електроприводом:

- Блок керування потужністю (БКП): Контролює подачу енергії до електроприводу для підтримки стабільної потужності та запобігання перевантаженню;
- Регулятор швидкості: Забезпечує підтримку заданої швидкості локомотива в умовах змінних навантажень, наприклад, на підйомах або при гальмуванні;
- Інвертори та випрямлячі: Виконують перетворення електричної енергії між змінним і постійним струмом залежно від типу двигуна, що використовується (асинхронний чи колекторний);
- Датчики: Датчики крутного моменту, швидкості, температури та напруги, що забезпечують інформацію для управління системою в реальному часі;
- Інтерфейс управління: Забезпечує зв'язок між машинистом і системою керування, дозволяючи змінювати режими роботи та отримувати інформацію про поточний стан системи.

2. Основні функції системи керування тягового електроприводу:

- Регулювання швидкості: Забезпечує плавний розгін і гальмування локомотива. Дозволяє адаптувати швидкість руху до умов колії та експлуатаційних вимог;
- Керування крутним моментом: Регулює крутний момент на двигуні для досягнення потрібної тягової сили в залежності від навантаження;
- Контроль напрямку руху: Дозволяє змінювати напрямок руху локомотива (реверсування) без затримок і значних втрат енергії;
- Енергозбереження: Оптимізує розподіл енергії між тяговими двигунами, що допомагає знизити загальне споживання електроенергії;
- Система захисту та діагностики: Включає моніторинг стану обладнання, що виявляє та попереджає про можливі несправності. Забезпечує захист від перевантажень, перегріву та інших небезпечних ситуацій;
- Автоматизація та дистанційне управління: Підтримує інтеграцію з автоматизованими системами управління локомотивом, що дозволяє машиністу контролювати всі процеси та здійснювати точне налаштування параметрів.

3. Переваги сучасних систем керування:

- Енергоефективність: Сучасні системи дозволяють знизити витрати енергії до 30% за рахунок точного керування швидкістю і навантаженням;
- Низькі експлуатаційні витрати: Завдяки використанню інтелектуальних алгоритмів і сучасних матеріалів зменшуються витрати на ремонт та обслуговування;
- Екологічність: Зниження викидів завдяки енергоощадному режиму роботи та зниженню втрат енергії;
- Інтеграція з автоматизованими системами: Сучасні приводи легко інтегруються в загальні системи управління локомотивом, забезпечуючи повний контроль над усіма параметрами.

Регулювання потужності, швидкості руху та тягового зусилля локомотива здійснюється за допомогою зміни напруги на якорі та коефіцієнта збудження колекторних ТЕД або через регулювання частоти й напруги живлення асинхронних ТЕД. Процес регулювання напруги реалізується кількома методами:

- Для локомотивів постійного струму – за допомогою перемикання груп тягових двигунів. Спочатку ТЕД з'єднуються послідовно (напруга на кожен ТЕД восьмивісного електровоза становить 375 В при напрузі контактної мережі 3 кВ). Потім можливий перехід до послідовно-паралельного з'єднання (2 групи по 4 ТЕД, з'єднаних послідовно, з напругою на один ТЕД – 750 В) і паралельного з'єднання (4 групи по 2 ТЕД, з'єднаних послідовно, де напруга на один ТЕД – 1500 В).

Для досягнення проміжних значень напруги в ланцюг підключають групи реостатів, що дозволяє отримати регульовальні кроки в діапазоні 40-60 В. Проте використання реостатів призводить до енергетичних втрат, оскільки частина електроенергії перетворюється у тепло та розсіюється в атмосферу;

- **на локомотивах змінного струму** - шляхом перемикання висновків вторинної обмотки трансформатора, шляхом перемикання висновків первинної обмотки трансформатора, шляхом плавного регулювання напруги.

- **для локомотивів із асинхронним тяговим приводом** – регулювання здійснюється через перетворення постійного струму у змінний струм із заданими

частотою та напругою, які модулюються тяговими інверторами. Ця технологія застосовується як на електровозах постійного струму, так і на тих, що працюють на змінному струмі. У випадку з останніми використовуються випрямно-інверторні перетворювачі, які забезпечують початкове перетворення змінного струму у постійний.

Регулювання щаблів може виконуватися вручну, коли машиніст обертає ручку контролера, або автоматично у сучасних локомотивах із мікропроцесорною системою управління. Ця система діє на основі параметрів, які задає машиніст, включно зі швидкістю руху та максимальним струмом тягових електродвигунів (ТЕД).

Сучасні електровози мають електронні системи управління, які забезпечують плавний пуск, оптимальне регулювання швидкості, а також гальмування. Завдяки такій системі машиніст може контролювати рівень потужності, яка подається на електродвигуни, що забезпечує кращу керованість локомотивом.

Таким чином, системи керування тягового електроприводу локомотива є ключовим елементом, що забезпечує ефективну і безпечну експлуатацію. Вони розвиваються у напрямку підвищення автоматизації, енергозбереження та надійності, що дозволяє локомотивам працювати більш стабільно та екологічно.

6.3 Основні типи систем керування тягового електропривода локомотива

Типи систем керування тяговим електроприводом:

- Релейно-контакторні системи: Це застарілі системи керування, що використовують контактори та реле для перемикання режимів роботи. Вони характеризуються низькою ефективністю, складністю обслуговування та великим енергоспоживанням;

- Тиристорні системи: Використовуються в електровозах постійного струму. Застосування тиристорів дозволяє плавно змінювати силу струму, що проходить до тягових двигунів, і забезпечує краще регулювання швидкості;

– Системи з частотно-регульованими приводами (ЧРП): Найсучасніші системи керування, що дозволяють точно керувати швидкістю і потужністю завдяки перетворенню частоти струму. Вони забезпечують високу ефективність, точність і адаптивність до змінних умов експлуатації;

– Системи з асинхронними двигунами: Такі системи керування використовують асинхронні двигуни змінного струму, які мають високу надійність і низькі витрати на обслуговування. Завдяки інверторам з'являється можливість точного регулювання частоти обертання.

Загалом СКЕП забезпечує плавний та ефективний рух локомотива, дозволяючи розвивати високу потужність для перевезення важких вантажів або великої кількості пасажирів на довгі відстані.

6.4 Аналітичний огляд різновидів алгоритмів керування

Зараз існують кілька основних методів регулювання швидкості асинхронних двигунів [5]:

Зміна напруги на статорі;

Зміна частоти напруги живлення статора, при цьому можливе одночасне коригування її величини;

Зміна активного електричного опору в колі ротора (для двигунів з фазним ротором);

Коригування кількості пар полюсів (для спеціальних полюсоперемикаючих двигунів);

Використання енергії ковзання через спеціальні каскадні схеми (для двигунів з фазним ротором);

Подвійне живлення двигуна (для двигунів з фазним ротором);

Зміна електричного опору в колі статора (для двигунів з короткозамкненим ротором);

Векторне керування. Завдяки розвитку напівпровідникових технологій, найбільш популярним є векторне (або орієнтоване за полем) керування. У вивченій

літературі аналізуються особливості застосування цього методу при різних умовах, з метою вдосконалення процесу керування [6,7,8,9].

Векторне керування можна розділити на пряме та непряме. Пряме векторне керування [6] вимагає використання спостерігача, що ускладнює математичну модель. Натомість, загальний алгоритм непрямого векторного керування АД є більш простим, оскільки не вимагає застосування спостерігача. Для моделювання систем керування АД зазвичай застосовують математичну модель, яка записується в стаціонарній системі координат (a-b).

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) - v\omega, \quad M = \mu(\psi_{2a}i_{1b} - \psi_{2b}i_{1a}), \\ \dot{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \\ \dot{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} + \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b}, \\ \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha\psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\ \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha\psi_{2b} - p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b},\end{aligned}\tag{6.1}$$

де ω – кутова швидкість ротора,

M_c – момент навантаження,

v – коефіцієнт в'язкого тертя,

u – миттєве значення напруги

Для переходу з системи координат (a-b), у синхронну систему координат ротора (d – q), яка обертається відносно стаціонарної системи координат з швидкістю ω_0 , виконується перетворення Парка-Горева, яке визначається наступними рівняннями:

$$\begin{aligned}x_{dq} &= e^{-J\varepsilon_0} x_{ab}, \\ x_{ab} &= e^{J\varepsilon_0} x_{dq}, \\ e^{-J\varepsilon_0} &= \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix},\end{aligned}\tag{6.2}$$

Ось перефразований варіант тексту, який має уникнути плагіату:

Алгоритми векторного керування, як прямого, так і непрямого типу, забезпечують такі характеристики якості:

точне асимптотичне досягнення заданої траєкторії швидкості та потокозчеплення;

асимптотичне орієнтування за вектором потокозчеплення ротора;

лінеаризацію підсистеми керування швидкістю до повністю керованого лінійного вигляду;

поділ електромеханічних та електромагнітних координат асинхронного двигуна при керуванні.

Процес синтезу алгоритмів керування починається з формування підсистеми регулювання потокозчеплення, після чого створюється підсистема для управління швидкістю. Обидві ці підсистеми розробляються за допомогою зворотної ітеративної процедури проектування.

Структура непрямого векторного керування включає наступні компоненти:

регулятор модуля вектора потокозчеплення у розімкнутому контурі:

(6.3)

(6.4)

(6.5)

регулятор струму по осі (d) (польової складової струму статора):

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma \left(\gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i \tilde{i}_{1d} - x_d \right), \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_{1d}, \end{aligned} \quad (6.6)$$

регулятор кутової швидкості:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{1q}^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* + v \omega^* \right), \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \end{aligned} \quad (6.7)$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[-k_\omega \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q \right) + \dot{\hat{M}}_c + \ddot{\omega}^* + v \dot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^*, \quad (6.8)$$

регулятор струму по осі (q) (моментної складової струму статора):

$$\begin{aligned} u_{1q} &= \sigma \left(\gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta \omega p_n \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_{iq} \tilde{i}_{1q} - x_q \right), \\ \dot{x}_q &= k_{ii} \tilde{i}_{1q}, \end{aligned}$$

6.5 Класифікація систем керування асинхронними двигунами

Для синтезу систем управління застосовується математичний опис асинхронного двигуна на основі узагальненої машини. Рівняння найбільш компактно записуються з використанням методу просторового вектора [7]:

$$\begin{aligned}\bar{u}_S &= R_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\psi}_S}{dt} + j\psi_k \bar{\psi}_S; \\ \bar{u}_R &= R_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\omega_k - \omega_{el}) \bar{\psi}_R; \\ \bar{\psi}_S &= L_S \bar{i}_S + L_m \bar{i}_R; \\ \bar{\psi}_R &= L_S \bar{i}_S + L_R \bar{i}_R; \\ M &= k_M \cdot \text{Mod}(\bar{\psi}_S \times \bar{i}_S); \\ \frac{d\omega}{dt} &= (M - M_C) / J.\end{aligned}\tag{6.10}$$

де $\omega_{el} = p\omega$; p - число пар полюсів двигуна; ω - кутова швидкість (частота обертання) ротора; $\bar{\psi}_S$ $\bar{\psi}_R$ - результуючі вектори потокозчеплення статора і ротора асинхронної машини відповідно; M - електромагнітний момент двигуна; M_C - момент опору на валу; J - сумарний момент інерції ротора і пов'язаних з ним мас.

Так як головний вихідний параметр асинхронного двигуна, - електромагнітний момент, - залежить від модуля і просторового розташування векторів, існуючі системи управління асинхронними двигунами з метою класифікації вельми зручно розбити на три великі групи, в яких регулюються [8]:

- 1) модуль вектора;
- 2) модуль і точне миттєве положення вектора на координатній площині;
- 3) модуль і сектор координатної площини, в якому знаходиться вектор.

Відповідно до запропонованого розбиття системи управління асинхронними двигунами можна відповідно поділити наступним чином:

- 1) скалярні;
- 2) векторні;
- 3) системи з розривним (дискретним) керуванням.

Скалярні системи управління є поширеним рішенням для електроприводів, що функціонують у режимах «плавного» навантаження. В таких умовах зміни параметрів асинхронного двигуна, зокрема швидкості обертання ротора або фазових струмів, відбуваються повільно та поступово. Завдяки цьому забезпечується стабільна робота системи та досягаються необхідні статичні характеристики, оскільки процеси можна розглядати як наближено сталі в конкретний момент часу. Це особливо актуально в ситуаціях, коли не відбувається різких або значних змін навантаження.

Тягові електроприводи, які використовуються в локомотивах, демонструють такі характеристики переважно під час квазістаціонарних режимів роботи. Висока інерційність навантаження, що виникає за умови доброго зчеплення коліс із рейками, забезпечує відносну сталість робочих режимів, навіть коли відбуваються незначні зміни параметрів руху. За таких обставин процеси в системі можна вважати майже постійними, що робить скалярне управління оптимальним рішенням для цієї категорії робочих режимів тягових електроприводів локомотивів.

Висновок. Електрична схема та системи керування тяговим електроприводом локомотива є важливими для забезпечення ефективної роботи і безпеки транспорту. Вони включають компоненти, такі як інвертори, випрямлячі, трансформатори та датчики, що дозволяють точно регулювати швидкість, потужність і напрямок руху локомотива, забезпечуючи оптимальне енергоспоживання.

Завдяки сучасним системам керування, таким як частотно-регульовані приводи і векторне керування, досягається значна енергоефективність, зниження експлуатаційних витрат і покращення екологічних характеристик.

Системи керування можуть бути класифіковані за типами, включаючи релейно-контакторні, тиристорні та сучасні частотно-регульовані системи, які сприяють стабільній і безпечній експлуатації локомотивів з високою надійністю.

7 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ САЕП

7.1 Математична модель системи управління асинхронного двигуна в dq-координатах

На початковому етапі розробки моделі асинхронного двигуна необхідно сформулювати певні допущення, які були прийняті у даній роботі [10]:

обмотки статора і ротора вважаються симетричними, тобто $R_A=R_B=R_C=R_s$ та $R_a=R_b=R_c=R_r$;

втрати енергії та насичення магнітних кіл у сталі як статора, так і ротора не враховуються;

намагнічувальні сили обмоток мають синусоїдальний розподіл уздовж окружності рівномірного повітряного зазору, що означає відсутність вищих гармонік магнітного потоку.

За вказаних допущень система диференціальних рівнянь електромагнітної рівноваги для кіл статора і ротора асинхронного двигуна може бути сформульована відповідно до закону Кірхгофа (7.1). Додатково застосовується закон Ампера, який встановлює зв'язок між потокозчепленням обмоток ψ_s і ψ_r та струмами, що протікають через ці обмотки.

Таким чином, загальна система рівнянь в узагальнених координатах набуває наступного вигляду:

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt}, \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt}, \\ \psi_s = L_s I_s + L_m I_r, \\ \psi_r = L_m I_s + L_r I_r, \end{cases} \quad (7.1)$$

де U_s і U_r - напруги статора і ротора, R_s і R_r - активні опори статора і ротора, I_s і I_r - струми статора і ротора, ψ_s і ψ_r - потокозчеплення статора і ротора, L_s і L_r - повні індуктивності кіл, L_m – взаємна індуктивність між статором і ротором.

Маємо рівняння, які є базовими для побудови моделей асинхронного двигуна у будь-яких ортогональних двофазних координатах:

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = R_s \tilde{I}_s + \frac{d\tilde{\psi}_s}{dt} + j\omega_k \tilde{\psi}_s, \\ \tilde{U}_r = R_r \tilde{I}_r + \frac{d\tilde{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - Z_p \omega) \tilde{\psi}_r, \\ \tilde{\psi}_s = L_s \tilde{I}_s + L_m \tilde{I}_r, \\ \tilde{\psi}_r = L_m \tilde{I}_s + L_r \tilde{I}_r, \end{cases} \quad (7.2)$$

Математична модель асинхронного двигуна в ортогональній системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора, ґрунтується на тому, що напрямок дійсної осі d у будь-який момент часу збігається з напрямком узагальненого вектора потокозчеплення ротора. Для реалізації цього підходу система координат повинна обертатися синхронно з вказаним вектором, у результаті чого вектор потокозчеплення ротора у цій системі матиме лише дійсну складову.

Таким чином, передумови для математичного опису асинхронного двигуна в таких координатах набувають наступного вигляду:

$$\omega_k = \omega_{\psi_r}, \quad (7.3)$$

$$\psi_{rq} = 0. \quad (7.4)$$

При живленні обмоток статора асинхронного двигуна від джерела напруги система векторного керування використовує зворотні зв'язки за складовими струму статора та потокозчепленням ротора. Це зумовлює необхідність отримання відповідних сигналів для забезпечення роботи системи. Для цього з другого рівняння, що описує потокозчеплення ротора ψ_r у системі (7.2), можна визначити узагальнений вектор струму ротора. Рівняння для потокозчеплення ротора має вигляд:

$$\tilde{I}_r = \frac{\tilde{\psi}_r}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} \tilde{I}_s, \quad (7.5)$$

з урахуванням позначень:

$$k_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r}, \quad (7.6)$$

підставимо отриманий вираз у перше рівняння системи для потокозчеплення ψ_s цієї системи:

$$\tilde{\psi}_s = L_s \tilde{I}_s + \frac{L_m}{L_r} \tilde{\psi}_r - \frac{L_m^2}{L_r} \tilde{I}_s = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r} \tilde{I}_s L_s + k_r \tilde{\psi}_r = \sigma L_s \tilde{I}_s + k_r \tilde{\psi}_r, \quad (7.7)$$

Після підстановки виразів (7.5) і (7.6) у перші два рівняння системи (7.2) одержимо

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = R_s \tilde{I}_s + \sigma L_s \frac{d\tilde{I}_s}{dt} + k_r \frac{d\tilde{\psi}_r}{dt} + j\omega_k (\sigma L_s \tilde{I}_s + k_r \tilde{\psi}_r), \\ 0 = \frac{1}{T_r} \tilde{\psi}_r - \frac{L_m}{T_r} \tilde{I}_s + \frac{d\tilde{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - Z_p \omega) \tilde{\psi}_r. \end{cases} \quad (7.8)$$

Щоб у першому рівнянні останньої системи залишилася похідна лише від одного сигналу, необхідно виразити похідну потокозчеплення ротора, використовуючи друге рівняння цієї системи.

$$\frac{d\tilde{\psi}_r}{dt} = k_r R_r \tilde{I}_s - \frac{1}{T_r} \tilde{\psi}_r - j(\omega_k - Z_p \omega) \tilde{\psi}_r, \quad (7.9)$$

і підставимо отриманий вираз у перше:

$$\tilde{U}_s = R_{sr} \tilde{I}_s + \sigma L_s \frac{d\tilde{I}_s}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \tilde{\psi}_r + j\omega_k \sigma L_s \tilde{I}_s - jZ_p \omega k_r \tilde{\psi}_r, \quad (7.10)$$

Застосовуючи загальну методику переходу від рівнянь в узагальнених векторах до рівнянь у їх дійсних та уявних складових, перетворимо рівняння (7.8) та (7.9) в узагальнених векторах на систему скалярних рівнянь.

$$\begin{cases} U_{sd} = R_{sr} I_{sd} + \sigma L_s \frac{dI_{sd}}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{rd} - \omega_k \sigma L_s I_{sq}, \\ U_{sq} = R_{sr} I_{sq} + \sigma L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega_k \sigma L_s I_{sd} - Z_p \omega k_r \psi_{rd}, \\ \frac{d\psi_{rd}}{dt} = \frac{L_m R_r}{L_r} I_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{rd}, \\ 0 = \frac{L_m R_r}{L_r} I_{sq} - (\omega_k - Z_p \omega) \psi_{rd}. \end{cases} \quad (7.11)$$

Диференційні рівняння у операторній формі, необхідні змінні струмів та потокозчеплення через оператор p , який відповідає диференціюванню за часом.

$$\begin{cases} U_{sd} + \frac{L_m R_r}{L_r^2} \psi_{rd} + \omega_k \sigma L_s I_{sq} = R_{sr} I_{sd} (T_{sr} p + 1), \\ U_{sq} - \omega_k \sigma L_s I_{sd} - Z_p \omega \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} = R_{sr} I_{sq} (T_{sr} p + 1), \\ \psi_{rd} = \frac{I_{sd} L_m R_r}{L_r p + R_r}, \\ \omega_k = \frac{L_m R_r I_{sq}}{L_r \psi_{rd}} + \omega_r. \end{cases} \quad (7.12)$$

Структурну схему моделі асинхронного двигуна, побудовану на основі вище наведених рівнянь, показано на рис. 7.1.

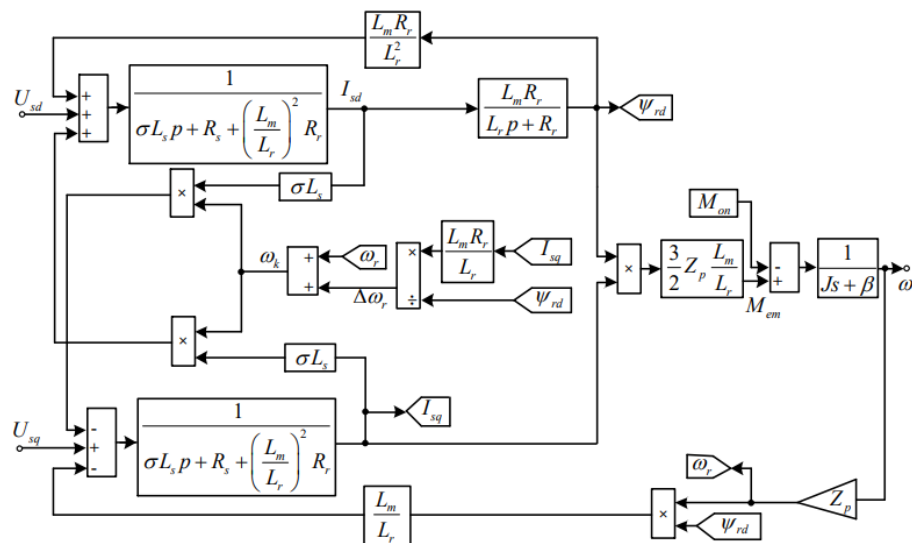


Рисунок 7.1 – Структурна схема моделі асинхронного двигуна в dq координатах

7.2 Генерування завдання на момент

Для побудови траєкторії моменту використовується функціональний блок Signal Builder. Оскільки подальше моделювання передбачає врахування різних мас рухомого складу, доцільно застосувати два блоки з різними траєкторіями, перемикаючись між ними. Графік моменту, що задається для розгону локомотива, наведено на рисунку 7.3.

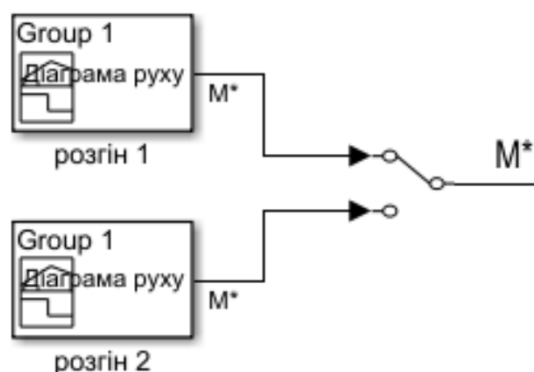


Рисунок 7.2 – Завдання на момент

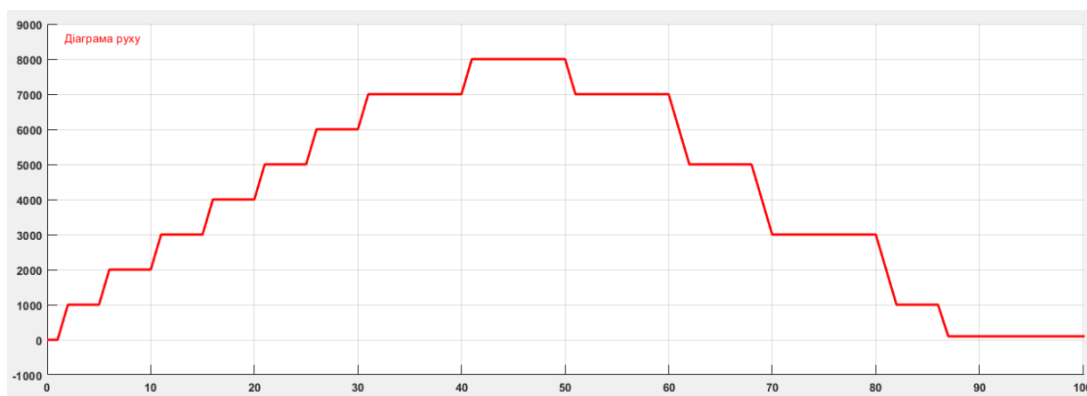


Рисунок 7.3 – Траекторія завдання моменту

Розрахунок завдання на струми. Завдання на відпрацювання струмів розраховується за рівняннями 7.13 та 7.14. Для зручності почергового моделювання двох різних стратегій керування також використовується перемикач.

$$\psi_{r\text{МТРА}}(T) = \sqrt{\frac{L_m}{k_T}} T = \sqrt{\frac{2L_r}{3z_p}} T. \quad (7.13)$$

$$i_{sdopt} = \sqrt{\frac{T}{k_T L_m}} \lambda, \quad i_{sqopt} = \sqrt{\frac{T}{k_T L_m}} \lambda. \quad (7.14)$$

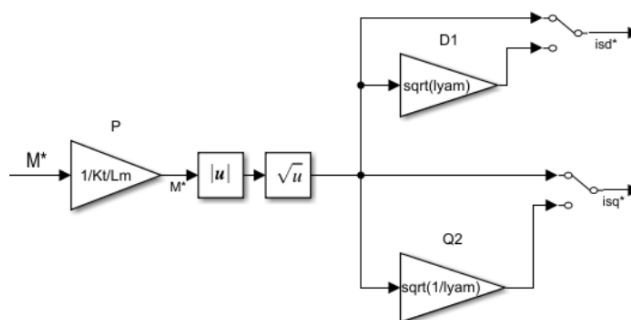
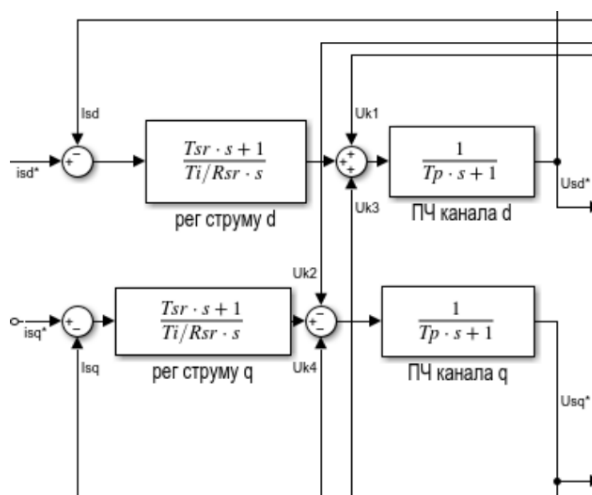
Рисунок 7.4 – Розрахунок струмів i_{sd} та i_{sq} 

Рисунок 7.5 – Розрахунок завдання напруги

Модель асинхронного двигуна будуватиметься в синхронній системі координат ротора ($d - q$).

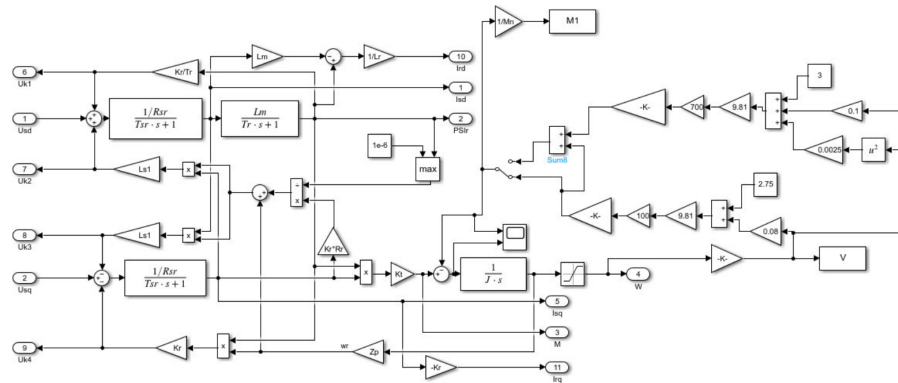


Рисунок 7.6 – Модель АД

Загальний вигляд математичної моделі зображено на рисунку 7.7.

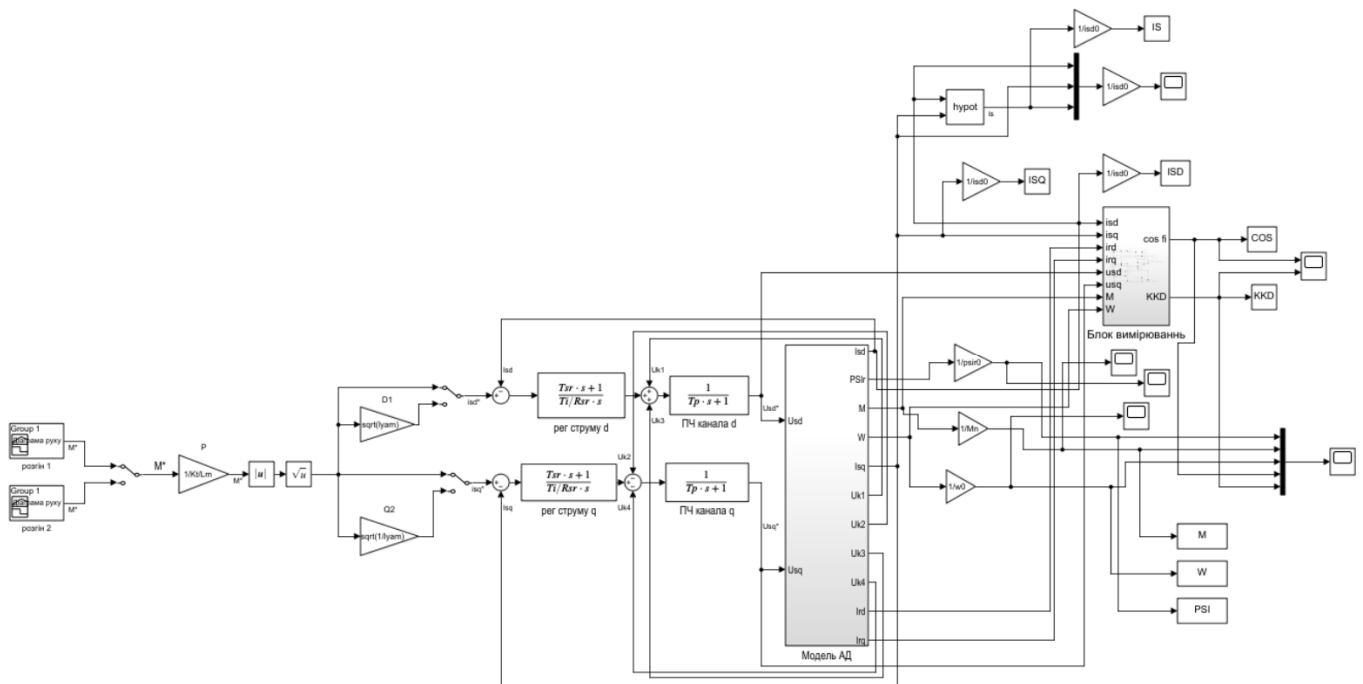


Рисунок 7.7 – Загальний вигляд моделі в MATLAB Simulink

Висновок. У цьому розділі було побудовано модель двигуна в обертовій системі координат для подальшого моделювання та аналізу характеристик обраної системи керування. Крім того, було розроблено енергоефективну систему керування та реалізовано її в програмному середовищі MATLAB Simulink.

8 РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

8.1 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна

Математичну модель асинхронного двигуна побудовано для Т-подібної схеми заміщення, зображеної на рисунку 8.1. У той же час параметри, наведені в каталозі, відповідають Г-подібній схемі заміщення, представлений на рисунку 8.2. Перехід параметрів із Г-подібної схеми до Т-подібної виконується за наступним алгоритмом.

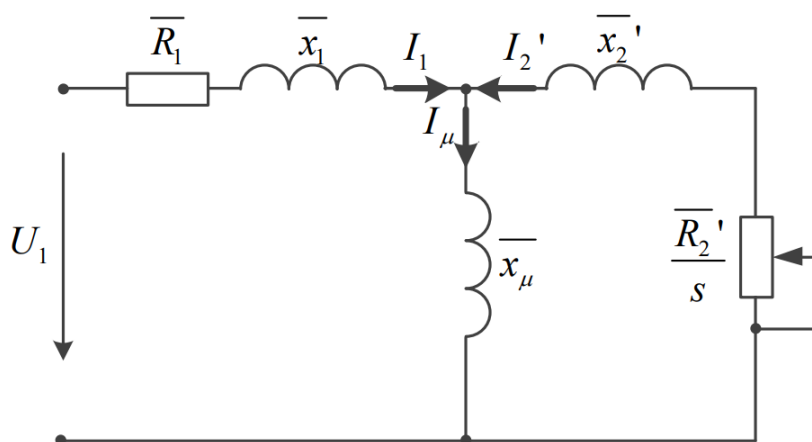


Рисунок 8.1 – Т-подібна схема заміщення АД

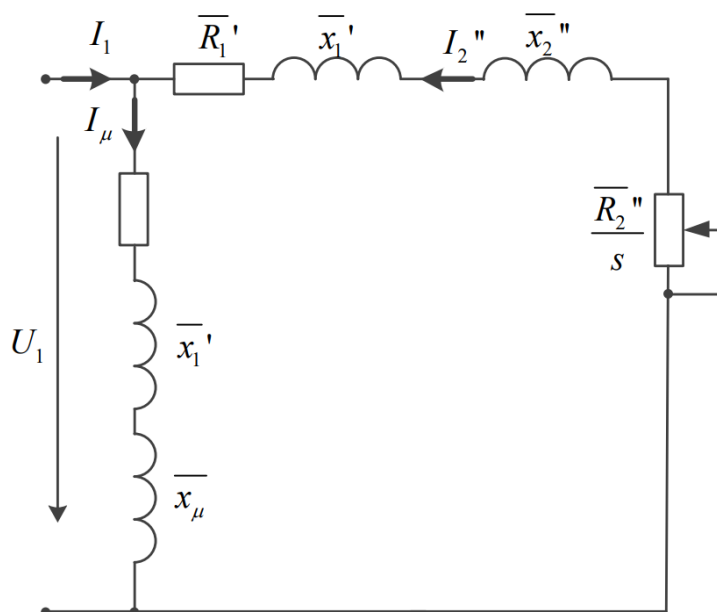


Рисунок 8.2 – Г-подібна схема заміщення АД

Коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення [22]:

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4\bar{x}'_1\bar{x}_\mu}}{2\bar{x}_\mu} = \frac{5.392 + \sqrt{5.392^2 + 4 \cdot 0.228 \cdot 5.392}}{2 \cdot 5.392} = 1.0406.$$

Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення подано, як у [1].

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\bar{x}_1 = \frac{\bar{x}'_1}{c_1} = \frac{0.228}{1.0406} = 0.2191, \quad \bar{R}_1 = \frac{\bar{R}'_1}{c_1} = \frac{0.033}{1.0406} = 0.0317,$$

$$\bar{x}'_2 = \frac{\bar{x}''_2}{c_1^2} = \frac{0.238}{1.0406^2} = 0.2198, \quad \bar{R}'_2 = \frac{\bar{R}''_2}{c_1^2} = \frac{0.025}{1.0406^2} = 0.0231.$$

Отримаємо значення параметрів Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях:

$$x_1 = \bar{x}_1 \frac{U}{I_n} = 0.2191 \frac{1080}{465.5731} = 0.5082 \text{ Ом},$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \frac{U}{I_n} = 0.0317 \frac{1080}{465.5731} = 0.0736 \text{ Ом},$$

$$x'_2 = \bar{x}'_2 \frac{U}{I_n} = 0.2198 \frac{1080}{465.5731} = 0.5098 \text{ Ом},$$

$$R_2 = \bar{R}'_2 \frac{U}{I_n} = 0.0231 \frac{1080}{465.5731} = 0.0536 \text{ Ом},$$

$$x_\mu = \bar{x}_\mu \frac{U}{I_n} = 5.392 \frac{1080}{465.5731} = 12.5079 \text{ Ом}.$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{0.5082}{357.5132} = 0.0014 \text{ Гн},$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x'_2}{\omega_0} = \frac{0.5098}{357.5132} = 0.0014 \text{ Гн}.$$

Індуктивність контуру намагнічування:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{12.5079}{357.5132} = 0.035 \text{ Гн.}$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.035 + 0.0014 = 0.0364 \text{ Гн,}$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.035 + 0.0014 = 0.0364 \text{ Гн.}$$

На основі проведених розрахунків обчислюємо значення параметрів: α , α_1 , β , γ , σ , μ_1 .

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.0536}{0.0364} = 1.4707 \text{ Ом/Гн,}$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.0736}{0.0364} = 2.0205 \text{ Ом/Гн,}$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}\right) = 0.0364 \left(1 - \frac{(0.035)^2}{0.0364 \cdot 0.0364}\right) = 0.0028 \text{ Гн,}$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.035}{0.0364 \cdot 0.0028} = 344.1662 \text{ 1/Гн,}$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0.0188}{0.0028} + 2.0205 \cdot 0.035 \cdot 344.1662 = 44.0585 \text{ Ом/Гн}$$

$$\mu_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0.035}{0.0364} = 1.4413.$$

8.2 Побудова механічної характеристики

Механічна характеристика електродвигуна – це залежність частоти обертання від моменту на валу. Побудова механічної характеристики виконується за допомогою формули Чекунова:

$$M = M_k \cdot \frac{2 + (s^2 - s_k^2) \cdot K_s}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (8.1)$$

де M_k – критичний момент;

s – ковзання;

s_k – критичне ковзання.

$$K_s = \frac{\frac{\lambda_n}{\lambda_m} \cdot \left(\frac{1}{s_k} + s_k \right) - 2}{1 - s_k^2}, \quad (8.2)$$

де λ_n – кратність пускового моменту;

λ_m – кратність критичного моменту.

Критичне ковзання визначається:

$$s_k = s_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{M_k}{M_{\text{ном}}} + \sqrt{\left(\frac{M_k}{M_{\text{ном}}} \right)^2 - 1} \right), \quad (8.3)$$

$s_{\text{ном}}$ – номінальне ковзання, яке визначається за формулою:

$$s_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_0}, \quad (8.4)$$

Побудуємо графіки механічних характеристик при номінальній швидкості обертання і при пониженій за допомогою ППП MathCAD.

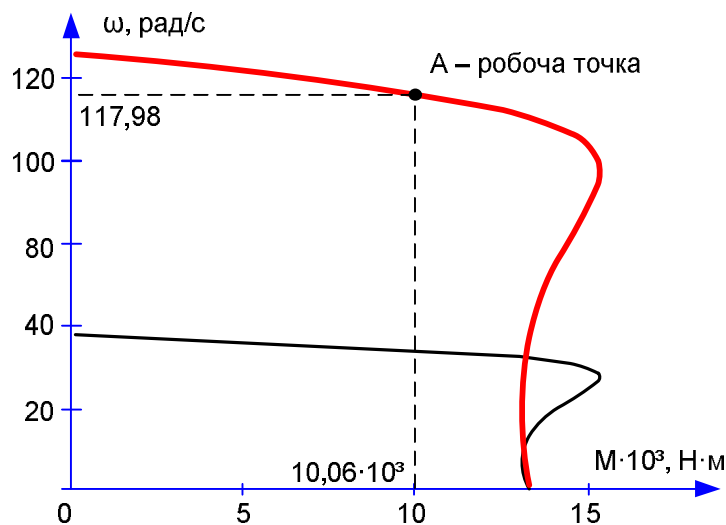


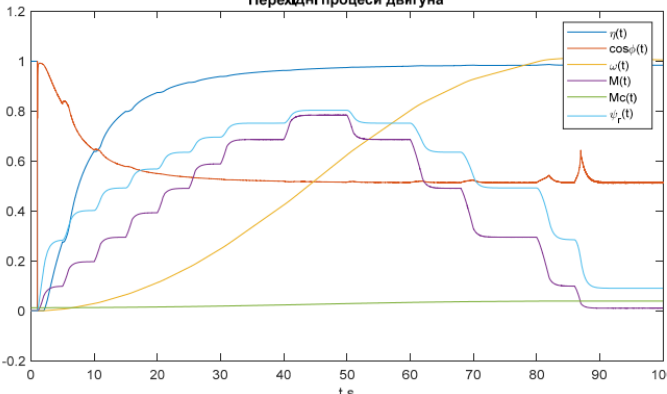
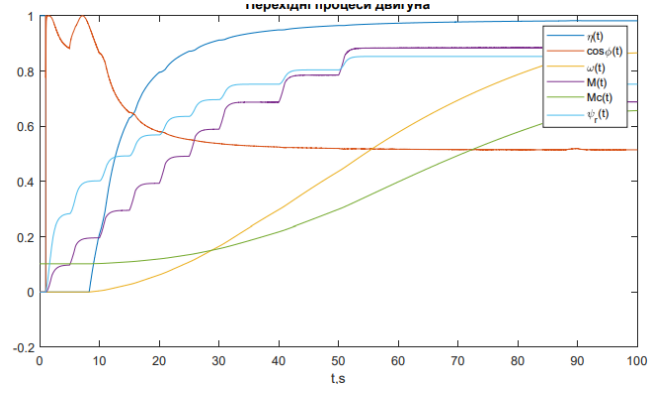
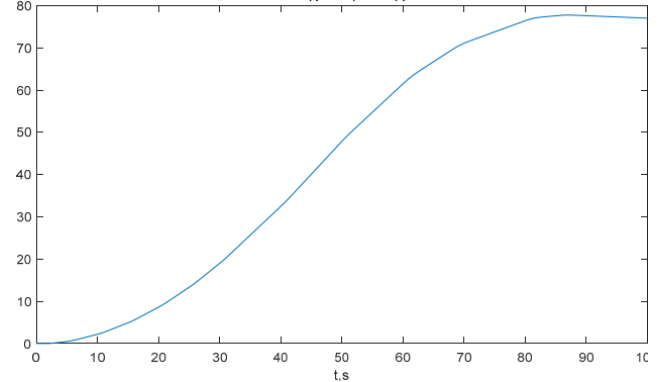
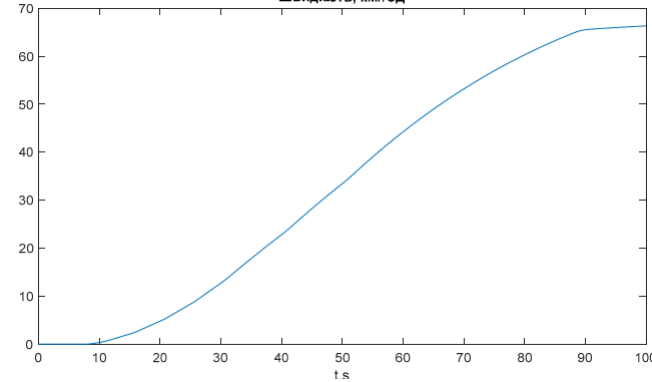
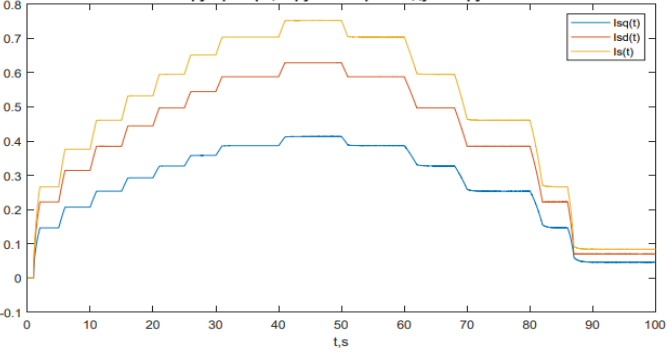
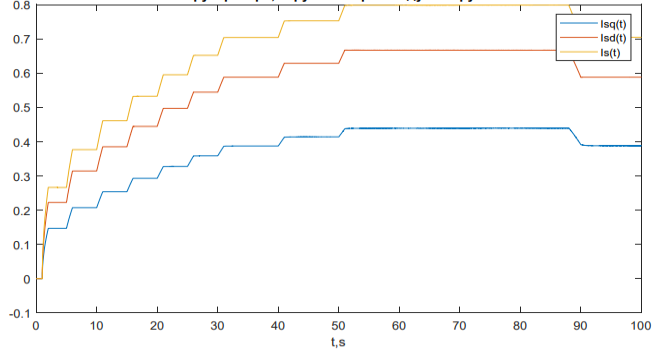
Рисунок 8.3 – Механічні характеристики АД (природня та при пониженні обертаннях)

Висновок: в даному розділі були розраховані статичні характеристики електродвигуна: механічні характеристики при двох швидкостях роботи електродвигуна: номінальній та пониженій.

9 РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ. ОЦІНКА СТІЙКОСТІ

У цьому розділі виконано дослідження роботи розробленої системи керування тягового електроприводу локомотива в середовищі MATLAB Simulink. Результати дослідження наведені в таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 – Результати дослідження

Дослідження перехідних процесів при розгоні локомотиву без вагонів	Дослідження перехідних процесів при розгоні локомотиву з вагонами (10 вагонів масою 600т)
	
характеристики зміни ККД, cosφ, кутової швидкості, моменту двигуна, моменту навантаження та поточозчеплення	
	
графік набору швидкості локомотива	
	
перехідні процеси струмів статора при використанні стратегії «максимальний ампер на момент»	

Моделювання проводилося для розгону локомотива та рухомого складу з вагонами, використовуючи модель асинхронного двигуна з системою керування, розробленою у попередніх розділах.

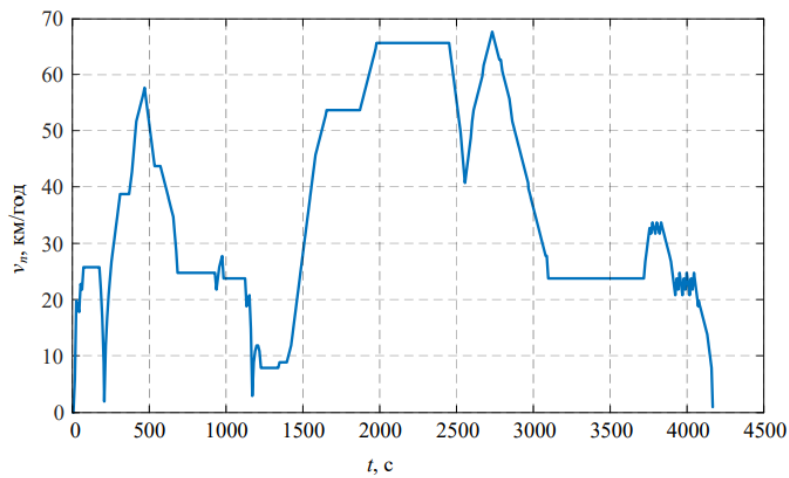


Рисунок 9.1 – Осцилограма зміни швидкості руху поїзда

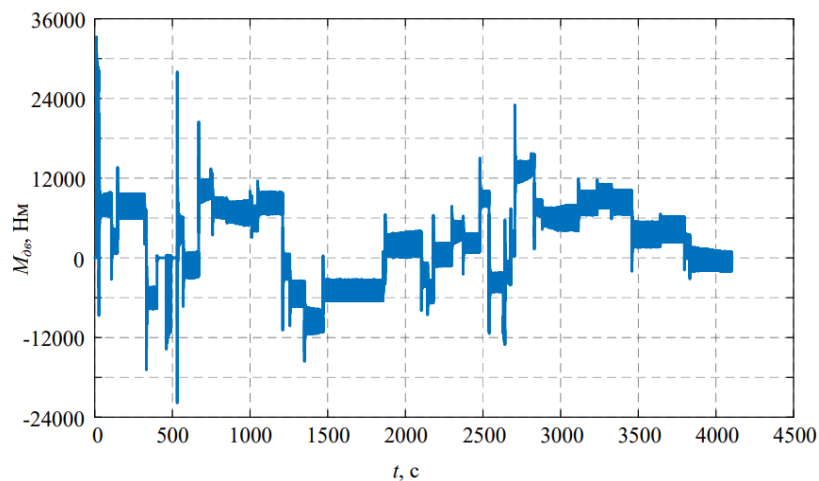


Рисунок 9.2 – Осцилограма зміни тягового моменту при русі поїзда

Висновки. У цьому розділі було виконано моделювання процесу розгону рухомого складу. Отримані результати демонструють, що обраний двигун успішно відпрацьовує задане навантаження та відповідає вимогам щодо потужності для встановлення на локомотив. Аналіз графіків показав, що розроблена система керування асинхронним двигуном забезпечує високий коефіцієнт корисної дії та ефективно реалізує необхідні режими роботи.

10 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

10.1 Визначення величини витрат запропонованого варіанту

Для реалізації технічних заходів, спрямованих на модернізацію системи керування тягового електропривода локомотива, важливим є своєчасне діагностування та обслуговування електротехнічного комплексу. Виробник фінансує цей процес власними ресурсами, беручи на себе витрати на розробку, впровадження та подальшу експлуатацію нових технічних рішень.

Капітальні вкладення охоплюють усі витрати, пов'язані з реалізацією проекту. Вони включають:

- розробку та проектування систем діагностування й контролю електрообладнання;
- придбання необхідних технічних засобів;
- доставку обладнання на підприємство, його монтаж та налагодження.

Вартість транспортних витрат залежить від маси вантажу, відстані перевезення та чинних тарифів на залізничні послуги. Монтаж обладнання оцінюється розрахунковим методом, але зазвичай для спрощення розрахунків приймається як 10% від загальної вартості обладнання.

Будівельні роботи також визначаються за розрахунковим методом і для попередніх оцінок приймаються рівними 10% вартості обладнання. До додаткових капітальних вкладень належать витрати на заходи з охорони довкілля, поліпшення умов праці, навчання персоналу та інші супутні витрати. До них також включається залишкова вартість обладнання, що підлягає заміні, але ще не повністю зношене.

Основна мета функціонального діагностування електрообладнання локомотива – забезпечення максимально ефективної та економічної експлуатації при дотриманні необхідного рівня надійності. Це дозволяє мінімізувати витрати на технічне обслуговування і ремонт. Для досягнення цієї мети здійснюється постійний

моніторинг технічного стану обладнання в процесі його експлуатації. Це забезпечує своєчасне попередження можливих відмов, скорочення простоїв через несправності, а також впровадження комплексу заходів для підтримки працездатності обладнання на основі отриманих діагностичних даних.

В таблиці 10.1 приведено розрахунок капітальних вкладень на впровадження системи діагностування та контролю електрообладнання локомотива.

Таблиця 10.1 – Капітальні витрати на електроустаткування

№ п/п	Найменування обладнання	Кошторисна вартість, грн.
1.	Блок попереджувальної сигналізації.	34000
2.	Блок короткочасного скидання режиму роботи ТЕП	35000
3.	Блок аварійного стану	40000
4.	Система індикації поточних значень, нештатних та аварійних показників.	22000
5.	СРУ (центральний процесор) обробки сигналів	10800
6.	Сенсори контролю параметрів (струму, напруги, положення, швидкості)	62000
7.	Нормуючий перетворювач	21000
8.	Мультиплексор	48000
9.	Кабелі, апарати захисту та інше обладнання	32000
10.	Вимірювальні прилади, показники, реєстратори захищеного виконання	72000
11.	Спеціалізований інструментарій	41500
	Всього	515500
	Монтажні та налагоджувальні роботи (10%)	51550
	Всього капітальні вкладення	567050

Отже, капітальні витрати $E_K = 567050$ грн.

10.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати включають витрати на забезпечення нормального функціонування певного технічного рішення в період його експлуатації в розрахунку на рік.

Експлуатаційні витрати E включають:

- 1) амортизаційні відрахування E_a ;
- 2) заробітна плата E_{zn} обслуговуючого персоналу (основна, додаткова, нарахування на заробітну плату);

- 3) витрати на силову електроенергію E_e ;
- 4) витрати на поточний ремонт E_{np} ;
- інші витрати $E_{ін}$. Тобто:

$$E = E_{ін} + E_{np} + E_e + E_{зп} + E_a . \quad (10.1)$$

10.3 Розрахунок амортизаційних відрахувань

Річні амортизаційні відрахування становлять (норма амортизації 10 % в рік):

$$E_k \cdot 10\% = E_a , \quad (10.2)$$

$$E_a = 0,1 \cdot 567050 = 56700 \text{ (грн.)}.$$

10.4 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу

Згідно ПУЕ обслуговувати установки до 1000 В може робітник, у якого розряд не нижче четвертого, група допуску не нижча третьої групи по електробезпеці. Тарифна сітка робітників, які працюють погодинно, приведена в таблиці 10.2.

Таблиця 10.2 – Тарифна сітка погодинників

Тарифні розряди	I	II	III	IV	V	VI
Тарифні коефіцієнти	1	1,5	1,8	2,03	2,33	2,7

Витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу розраховуємо за формулою:

$$E_{зп} = E_{зо} + E_{зд} + E_{зн} . \quad (10.3)$$

де $E_{зо}$ – основна заробітна плата по тарифу;

$E_{зд}$ – додаткова заробітна плата;

$E_{\text{зн}}$ – нарахування на заробітну плату.

$$E_{\text{зо}} = NT_I K \Phi_{\text{еф}} K_c \beta. \quad (10.4)$$

де N – кількість робітників, що обслуговують установку ($N = 10$ чол.);

T_I – погодинна тарифна ставка робітника 1-го розряду ($T_I = 220$ грн/год);

K – тарифний коефіцієнт ($K = 2,33$);

$\Phi_{\text{еф}}$ – ефективний фонд робочого часу на обслуговування системи діагностування та контролю електрообладнання рудникового електровоза за рік (приймаємо $\Phi_{\text{еф}} = 120$ год);

K_c – коефіцієнт співвідношення, встановлений Генеральною угодою між профспілками і урядом ($K_c = 1$);

β – частка часу, який витрачає робітник на обслуговування системи діагностування та контролю електрообладнання рудникового електровоза в загальному часі своєї роботи ($\beta = 0,8$).

Розраховуємо основну заробітну плату по тарифу:

$$E_{\text{зо}} = 22 \cdot 2,33 \cdot 120 \cdot 10 \cdot 0,8 = 49210 \text{ (грн.)}.$$

Додаткова заробітна плата $E_{\text{зд}}$ становить 10% основної заробітної плати:

$$E_{\text{зд}} = 49210 \cdot 0,1 = 4920 \text{ (грн.)}.$$

Розрахунок нарахувань на заробітну плату зведемо в таблицю 10.3.

Таблиця 4.3 – Розрахунок нарахувань на заробітну плату

Показник	Сума
Основна заробітна плата $E_{\text{зо}}$, грн.	49210
Додаткова заробітна плата $E_{\text{зд}}$, грн.	4920
Разом основна і додаткова заробітна плата, $(E_{\text{зо}} + E_{\text{зд}})$, грн.	54130
Єдиний внесок на загальнообов'язкове соціальне страхування (22%), грн.	11910
Всього нарахування, грн	66040

Таким чином, маємо:

$$E_{\text{зн}} = 49210 + 4920 + 11910 = 66040 \text{ (грн.)}.$$

10.5 Розрахунок витрат на силову електроенергію

Витрати на силову електроенергію знаходимо за формулою:

$$E_e = \frac{P}{\eta} \cdot B \cdot \Phi_{\text{ЕФ}} \cdot K_{\text{ВМ}} \cdot K_3. \quad (10.5)$$

де B – вартість електроенергії. Ціна на універсальні послуги для малих непобутових споживачів (Постанова НКРЕКП від 11.12.2018 №1863), електроустановки яких приєднані до електричних мереж згідно з класом напруги з ПДВ складає приблизно 3,44 грн/кВт·год.

P – номінальна потужність;

η – коефіцієнт корисної дії ($\eta = 0,85$);

$T_{\text{еф}}$ – ефективний фонд часу роботи в рік;

$K_{\text{ВМ}}$ – коефіцієнт ввімкнення (використання за часом $K_{\text{ВМ}} = 0,8$);

K_3 – коефіцієнт завантаження (використання за потужністю).

Номінальна потужність системи контролю та захисту електрообладнання складає 3 кВт.

Коефіцієнт ввімкнення приймаємо рівним 0,8.

Ефективний фонд робочого часу при режимі роботи в 1 зміну протягом 95% часу за рік становить:

$$\Phi_{\text{еф}} = 220 \cdot 8 \cdot 0,95 = 1672 \text{ (год.)}.$$

Після підстановки всіх відомих показників у вираз отримаємо:

$$E_e = \frac{3}{0,85} \cdot 3,44 \cdot 1672 \cdot 0,8 \cdot 0,84 = 13640 \text{ (грн.)}.$$

10.6 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання

Поточний ремонт електроустаткування здійснюється на місці встановлення з його відключенням і зупинкою, силами змінного ремонтного персоналу.

Витрати на проведення ремонтних робіт включають витрати на комплектуючі і запасні частини та інші елементи, які підлягають заміні та витрати на оплату праці персоналу, який проводить ремонтні роботи. Для визначення витрат на оплату праці робітників-ремонтників необхідно розрахувати трудомісткість ремонтних робіт. Трудомісткість ремонтних робіт визначається згідно графіка планово-попереджувальних ремонтів (таблиця 10.4), у якому зазначено тривалість міжремонтних періодів та трудомісткість кожного виду ремонту.

Вважаємо, що ремонтні роботи проводить електромонтер шостого розряду. Із врахуванням того, що відомою є трудомісткість робіт ремонтного працівника (таблиця 10.4), основну заробітну плату розрахуємо за формулою:

$$E_{30} = T_I \cdot K \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot \quad (10.6)$$

$$E_{30} = 220 \cdot 2,7 \cdot 112 = 66530 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 10.4 – Графік ремонтів

Найменування обладнання	Види ремонтів по місяцях												Трудомісткість, люд/год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Блоки режимів роботи			6				7				7		20
Система індикації		3				3					3		9
Мультиплексор				4				4				5	11
CPU		6				6				8			20
Сенсори параметрів	4				5				6				15
Нормуючий перетворювач			3				3				3		9
Вимірювальні прилади		5				5					5		15
Кабелі, апарати захисту				4				4				5	13
Загальна трудомісткість													112

Нарахування на заробітну плату (22%):

$$E_{3n} = 66530 \cdot 0,22 = 14640 \text{ (грн.)}$$

Всього витрати на заробітну плату для проведення ремонтних робіт становлять:

$$E_{3p} = 66530 + 14640 = 81170 \text{ (грн.)}$$

Витрати на матеріали, комплектуючі та запасні частини для поточного ремонту приймають рівними 15% витрат від основної заробітної плати. Тобто, витрати на матеріали для ремонтів становить:

$$E_m = 66530 \cdot 0,15 = 9980 \text{ (грн.)}.$$

Всього витрати на поточний ремонт обладнання становлять:

$$E_{\text{пр}} = 81170 + 9980 = 91150 \text{ (грн.)}.$$

10.7 Інші витрати

Розмір інших витрат рівний 5% від загальної суми попередніх витрат:

$$E_{\text{ін}} = (E_a + E_{\text{зп}} + E_e + E_{\text{пр}}) \cdot 5\% . \quad (10.8)$$

$$E_{\text{ін}} = (56700 + 66040 + 13640 + 91150) \cdot 0,05 = 11380 \text{ (грн.)}$$

Розрахунок загальної суми експлуатаційних витрат наведемо в таблиці 10.5.

Таблиця 10.5 – Розрахунок сумарних експлуатаційних витрат

Найменування витрат	Сума витрат, грн.
Амортизаційні відрахування E_a , грн.	56700
Заробітна плата $E_{\text{зп}}$ обслуговуючого персоналу, грн.	66040
Витрати на електроенергію E_e , грн.	13640
Витрати на поточний ремонт $E_{\text{пр}}$, грн.	91150
Інші витрати $E_{\text{ін}}$, грн.	11380
Всього експлуатаційні витрати E , грн.	238910

Висновок. В даному розділі було проведено розрахунок капітальних вкладень створення системи діагностування та контролю електрообладнання локомотива. Була розрахована основна заробітна плата, витрати на електроенергію, на планові ремонти та інші витрати. Оскільки, прибуток або ефект від впровадження системи невідомий або не розраховується як такий, тому термін окупності наразі неможливо розрахувати, тому зупиняємося на експлуатаційних витратах.

11 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У даній магістерській роботі розглядається модернізація системи керування тягового електропривода локомотива. Охорона праці – це система правових, економічних, організаційно-технічних, санітарно гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини під час трудової діяльності.

Соціальне значення охорони праці полягає в сприянні росту ефективності суспільного виробництва шляхом безперервного вдосконалення і поліпшення умов праці, підвищення їх безпеки, зниження виробничого травматизму і профзахворювань. Економічне значення охорони праці визначається ефективністю заходів з покращення умов і підвищення безпеки праці та є економічним виразом соціальної значущості охорони праці.

На електротехнічний оперативно-ремонтний персонал, який обслуговує обладнання для виготовлення та наладки модернізованого тягового електропривода локомотива впливають наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, у відповідності з їх класифікацією [ГОСТ 12.0.003-74].

1) фізичні:

- підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони;
- підвищена та понижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень вібрації;
- підвищена та понижена рухомість повітря;
- підвищена та понижена вологість повітря;
- небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- нестача природного світла;

- недостатня освітленість робочої зони;
- пряма і відбита блискучість.

2) психофізіологічні:

- фізичні перевантаження (динамічні);
- нервово-психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, монотонність праці).

11.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

11.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць у приміщенні для ТО

Приміщення для виготовлення та наладки модернізації тягового електропривода наведено на рисунку 11.1.

Загальна площа складає 120 м^2 , в трьох виробничих приміщеннях розташовано 6 робочих місць, отже, площа на одного працівника складає 20 м^2 , що відповідає нормованому значенню не менше 6 м^2 .

Вимоги безпеки під час виконання робіт

1. Під час виконання службових обов'язків працівник повинен мати при собі посвідчення про перевірку знань з питань охорони праці. У разі відсутності посвідчення або наявності посвідчення з простроченими термінами перевірки, працівник до роботи не допускається.
2. Роботи в електроустановках щодо заходів безпеки діляться на 3 категорії:
 - зі зняттям напруги;
 - без зняття напруги на струмоведучих частинах або поблизу них;
 - без зняття напруги далеко від струмоведучих частин, що знаходяться під напругою.

3. Працівники, зайняті виконанням спеціальних видів робіт, до яких висуваються додаткові вимоги безпеки, повинні бути навчені безпечному виконанню таких робіт і мати відповідний запис у посвідченні про перевірку знань.

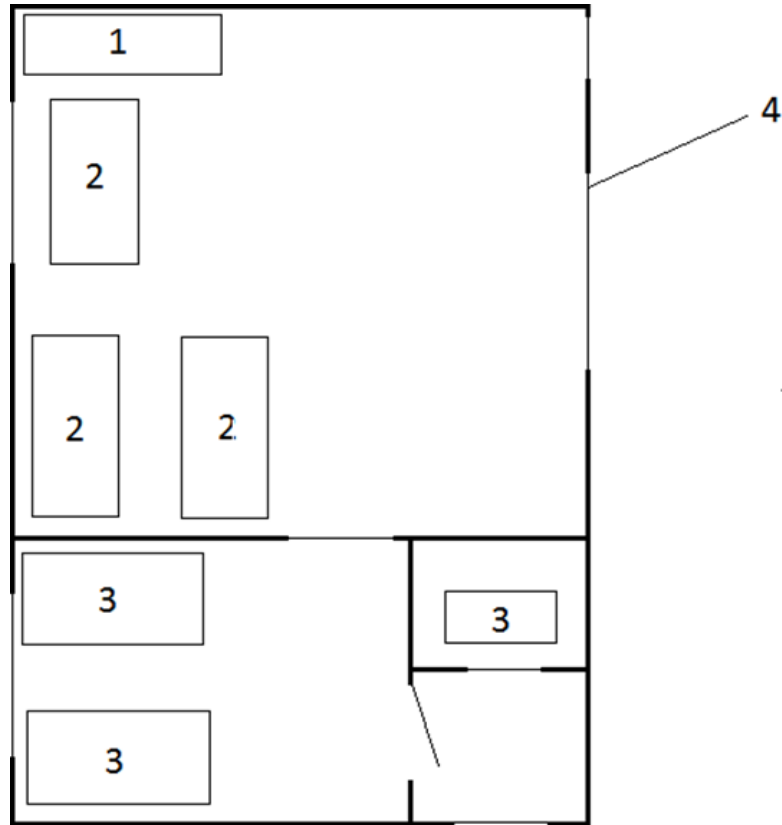


Рисунок 11.1 – Зображення приміщення і робочих місць де:

1 – шафа для працівників); 2 – обладнання для ремонту ; 3 – столи для наладки контролерів та перевірки; 4 – ролет для заведення тягового електропривода локомотива.

Працівник, який обслуговує закріплені за ним електроустановки напругою до 1000 в одноосібно, повинен мати III групу з електробезпеки.

Під час виконання робіт в електроустановках необхідно виконувати організаційні заходи, які забезпечують безпеку робіт:

- оформлення робіт нарядом-допуском, розпорядженням згідно переліку робіт, які виконуються в порядку поточної експлуатації;
- підготовку робочих місць;
- допуск до роботи;

- нагляд під час виконання робіт;
- переклад на інше робоче місце;
- оформлення перерв у роботі та її закінчення.

4. Для підготовки робочого місця до роботи, яка вимагає зняття напруги, слід застосувати, в зазначеному порядку, наступні технічні заходи:

- провести необхідні відключення і вжити заходів, які виключають помилкове або мимовільне включення комутаційної апаратури;
- вивісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційною апаратурою;
- перевірити відсутність напруги на струмоведучих частинах, які слід заземлити для захисту людей від ураження електричним струмом;
- встановити заземлення (включити заземлювальні ножі, застосувати переносні заземлення);
- обгородити, при необхідності, робочі місця або струмоведучі частини, які залишилися під напругою, і вивісити на огорожах плакати безпеки.

Залежно від місцевих умов, струмоведучі частини обгородити до або після їх заземлення.

5. Роботи без зняття напруги на струмоведучих частинах або поблизу них слід виконувати не менше як двом працівникам, один з них керівник робіт повинен мати групу IV; інші групу III з обов'язковим оформленням роботи нарядом-допуском або розпорядженням.

6. Під час зняття і встановлення запобіжників під напругою в електроустановках напругою до 1000 В необхідно попередньо вимкнути всі навантаження, які живляться через зазначені запобіжники; користуватися при цьому ізолюючими кліщами або діелектричними рукавичками, а при наявності відкритих плавких вставок також і захисними окулярами.

7. Роботу із застосуванням драбин слід виконувати удвох, один з працівників повинен знаходитися знизу. Стояти на ящиках або інших предметах забороняється. У разі установки приставних драбин на балках, елементах металевих

конструкцій і т.п. необхідно надійно закріпити верхівку і низ драбини на конструкціях.

В процесі обслуговування і ремонту електроустановок застосування металевих драбин забороняється.

11.1.2 Електробезпека

Живлення силового обладнання та системи освітлення приміщення для обстеження, технічного обслуговування та оперативного ремонту модернізованого тягового електропривода локомотива здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 - 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Категорія умов по небезпеці електротравматизму – підвищеної небезпеки, у зв'язку з наявністю у цехах підвищеної вологості. Технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально- струмовідними елементами електроустаткування, необхідно:

- розміщувати неізольовані струмовідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах;
- використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки;
- підвід кабелів до споживачів у закритих конструкціях підлоги;

2) При живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі.

Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника.

3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

Всі обертові частини механізму повинні мати добре закріплену огорожу.

Забороняється виконувати всі види ремонту під час роботи установки.

Для надання першої медичної допомоги при нещасних випадках повинна бути аптечка з набором необхідних перев'язочних матеріалів та медикаментів.

11.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

11.2.1 Мікроклімат

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні встановлюють допустимі температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних

діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення.

Таблиця 11.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт Па.

Період року	Категорія робіт	Температура, °С		Відносна вологість	Швидкість руху
		Допустима		Допустима на Постійних та непостійних робочих місцях, не більша	Допустима на Постійних та непостійних робочих місцях, не більша
		Верхня межа	Нижня межа		
		На робочих місцях			
		Не Постійних	Не постійних		
Холодний	Легка Іб	25	17	75	0.1
Теплий	Легка Іб	30	19	65	0.2-0.6

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено:

1. Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні оптимальних параметрів мікроклімату не повинні бути більше ніж на 2°C за діапазон норм.
2. Якщо температура поверхонь вище або нижче оптимальної температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше їм.
3. Для забезпечення нормованих значень руху кисню проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

11.2.2 Склад повітря робочої зони

Робочою зоною вважається простір, який обмежений огорожуючими конструкціями виробничих приміщень, що мають висоту 2 м над рівнем підлоги або площини, на яких знаходяться місця постійного або непостійного перебування

працюючих. Склад повітря робочої зони залежить від складу атмосферного повітря і впливу на нього ряду шкідливих виробничих факторів, утворених в процесі трудової діяльності людини. Склад повітря залишається постійним. Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м^3 .

Таблиця 11.2- Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування	ГДК, мг/куб.м		Клас
Речовини	Максимально разова	Середньодобова	небезпечності
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця. Нагромадження пилу глибиною в 1/8" у будь-якій області вказує на необхідність у вживанні заходів по очищенню області. Необхідно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (зернистість), тим вище небезпека.

Тому необхідно здійснювати наступні заходи:

- очищувати металевий пил якнайчастіше.
- щодня протирати гарячі поверхні.
- принаймні, двічі в рік проводити генеральне прибирання всіх областей, включаючи кроквяні ноги, з використанням продувки або пилососа.
- при високих концентраціях обробляти області по частинам.

Низька вологість збільшує потенційну небезпеку, це повинне прийматися в увагу при продувках.

Планувати продувки або прибирання так щоб вони приходилось на час коли устаткування виключене, як, наприклад, у другу половину дня п'ятниці або на вихідні.

11.2.3 Виробниче освітлення

Природне освітлення

В залежності від джерела світла промислове освітлення поділяється на природне та штучне освітлення.

Нормовані значення згідно ДБН В.2.5-28:2018 наведено в таблиці 11.3.

Природне освітлення - освітленість приміщень світлом неба (прямого або відображеного), яке проникає через світлові пройми в зовнішніх огорожених конструкціях. По своєму спектральному складу воно є найбільш сприятливим. Природне освітлення характеризується коефіцієнтом природної освітленості КПО (е). КПО - відношення природного освітлення, яке створюється в деякій точці заданої площини всередині приміщення світлом неба, до значення зовнішньої горизонтальної освітленості.

КЕО при природному та сумісному освітленнях.

Характеристика зорової роботи – дуже малої точності; Розряд - IV;

Контраст об'єкту розпізнавання - незалежно від характеристик фону і контрасту об'єкту з фоном;

Характеристика фону - незалежно від характеристик фону і контрасту об'єкту з фоном;

Бокове КЕО, %:

- природне 0,5;
- суміщене 0,3.

Основною величиною для розрахунку і нормування природного освітлення є коефіцієнт природної освітленості (КПО). Прийняте роздільне нормування КЕО для бічного і верхнього освітлення. Ті місця, що освітлюється тільки бічним світлом, нормується мінімальне значення КЕО в межах робочої зони, що повинно бути забезпечене в точках, найбільше віддалених від вікна.

Таблиця 11.3 – Штучне та природне освітлення приміщень

Характеристика зорової роботи	Найменший або еквівалент-ний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне освітлення		Природне	суміщене
						Освітленість, лк		КПО, ед, %	
						при системі комбінованого освітлення		при природному або суміщеному освітленні	при боковому освітленні
						Всього	у т. ч. від загального		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 Включно	IV	б	середній	темний	500	200	2.4	0.9
			в	середній	середній	400	200		

Штучне освітлення.

Штучне освітлення буває двох систем: загальне або комбіноване. Загальне освітлення - освітлення, при якому світильники розміщуються у верхній зоні приміщення рівномірно або пристосоване до розташування обладнання. Комбіноване освітлення - додаткове освітлення, при якому до загального освітлення додається ще й місцеве. Місьцеве освітлення - освітлення, яке створюється світильниками, концентруючими світловий потік безпосередньо на робочих місцях.

11.2.4 Виробничий шум

P_0 - нульове значення звукового тиску на нижньому порозі чутності в октавній смузі зі середньгеометричною частотою 1000 Гц, умовно прийняте рівним $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Таблиця 11.4 – Допустимі рівні шуму

Вид трудової діяльності	Рівні звукового тиску в дБ в октавних смугах із середньо герметичними частотами, Гц								
	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
На постійних Робочих місцях у виробничих приміщеннях та на території підприємства.	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки».

Шум порушує нормальну роботу шлунка, особливо впливає на центральну нервову систему. Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту - «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі.

- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

11. 2.5 Вібрації

Вібрація – механічні коливання машин, обладнання, інструменту. Зіткнення їх з тілом працівника призводить до коливання рук, ніг, спини або всього організму.

Джерелами вібрації є ручні механізовані машини ударної, ударно- обертової та обертової дії з пневматичним або електричним приводом.

Джерелами вібрації в громадських будівлях є інженерне і санітарно- технічне обладнання.

Таблиця 11.5 - Допустимі рівні вібрації на постійних місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація:	1,3	0,45	0,22	0,2	0,2	0,2	-	-	-	-
На постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	108	99	93	92	92	92				

Основні параметри вібрації, такі як середньоквадратичне значення віброприскорення та віброшвидкості, логарифмічні рівні приведені у таблиці 11.6.

Таблиця 11.6 - Середньоквадратичні значення віброприскорення та віброшвидкості

Категорія вібрації по санітарним нормам	Напрямок дії	Нормативні, корекційовані по частоті та еквівалентні корекційовані			
		Віброприскорення		Віброшвидкість	
		$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	ДБ	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 10^{-2}$	ДБ
Загальні	Z_0, Y_0, X_0	0,1	100	0,2	92

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено:

- динамічне погашення вібрації - приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи;
- зміна конструктивних елементів машин;
- застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

11.2.6 Психофізіологічні фактори

Психофізіологічні фактори вибираються відповідно з Гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, затвердженої Наказом Міністерства охорони здоров'я від 11 серпня 2014 року.

Фізичні навантаження.

Робоча поза: Періодичне перебування в незручній та/або фіксованій позі до 50% часу зміни; перебування у вимушеній позі (навпочіпки, на колінах і т. ін.) від 10% до 25% часу зміни; знаходження в позі стоячи від 60% до 80% часу зміни.

Сумарна маса вантажів, що переміщуються протягом кожної години зміни: з робочої поверхні (чоловіки): до 1500.

Нахили корпуса (вимушені, більше 30), кількість за зміну: 101 –300 Переміщення у просторі (переходи, обумовлені технологічним процесом протягом зміни), км.

Інтелектуальні навантаження: Рішення складних завдань з вибором за відомим алгоритмом (робота за серією інструкцій).

Зміст роботи: Сприймання сигналів з наступним порівнянням фактичних значень параметрів з їх номінальним значеннями. Заключна оцінка фактичних значень параметрів, Обробка, перевірка і контроль за виконанням завдання, Робота в умовах дефіциту часу

Сенсорні навантаження:

Тривалість зосередженого спостереження (в % від часу зміни) 51 -75 Щільність сигналів (світлових, звукових) та повідомлень в середньому за годину роботи 176–300

Кількість виробничих об'єктів одночасного спостереження 11-25

Навантаження на зоровий аналізатор (Спостереження за екранами відеотерміналів (годин на зміну) 3-4

Навантаження на слуховий аналізатор (при виробничій необхідності сприйняття мови чи диференційованих сигналів) Розбірливість слів та сигналів від 70% до 50%

Навантаження на голосовий апарат (сумарна кількість годин, що наговорюються протягом тижня) 20-25

Емоційне навантаження:

Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності. Значущість помилки Несе відповідальність за функціональну якість основної роботи (завдань). Вимагає виправлень за рахунок додаткових зусиль всього колективу (групи, бригади та ін.)

Ступінь ризику для власного життя

Ступінь відповідальності за безпеку інших осіб Монотонність навантажень:

Кількість елементів (прийомів), необхідних для реалізації простого завдання або в операціях, які повторюються багаторазово 5-2

Тривалість виконання простих виробничих завдань чи операцій, що повторюються (сек.) 24-2

Монотонність виробничої обстановки (час пасивного спостереження за технологічним процесом в % від часу зміни) 91-95

Режим праці

Фактична тривалість робочого дня (год.) 10– 12

Змінність роботи Тризмінна робота (робота у нічну зміну) Наявність регламентованих перерв та їх тривалість

Перерви нерегламентовані або недостатньої тривалості до 3% часу зміни

11.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи модернізованого тягового електропривода локомотива в умовах дії загрозливих чинників в надзвичайних ситуаціях

Забезпечення стійкої роботи модернізованого тягового електропривода локомотива в умовах надзвичайних ситуацій є одним із головних завдань в процесі проектування. Серед всіх чинників надзвичайних ситуацій, що можуть виникнути і вивести з ладу модернізований тягового електропривода локомотива можна виділити найзагрозливіші три: вплив електромагнітного імпульсу, іонізуючих випромінювань і температурний вплив при пожежі в наслідок короткого замкнення у автомобілі.

Гамма-випромінювання є найнебезпечнішим джерелом енергії, воно проникає у повітрі на відстань сотень метрів. Бета-випромінювання проникає в повітрі на відстань кількох метрів, а в живих тканинах кількох міліметрів. Альфа-частинки

мають найкоротший радіус дії (кілька сантиметрів у повітрі, 0,1 мм у тканинах), а тому небезпечні лише у разі безпосереднього контакту з слизовими оболонками. Особливим видом іонізуючого випромінювання є нейтронне випромінювання (n), яке має місце при деяких діленнях урану або плутонію.

В результаті дії ЕМІ імпульс струму чи напруги проникає в систему і спричиняє пошкодження, ступінь яких залежить від чутливості складових системи вузлів. Серйозні пошкодження викликає ЕМІ в роботі цифрових і контрольно-вимірювальних приладів.

Дія електромагнітного імпульсу може призвести до загорання чутливих електричних та електронних елементів, а також до серйозних порушень в цифрових і контрольних пристроях. Електромагнітний імпульс пробиває ізоляцію, випалює елементи мікросхем, викликає коротке замикання. Саме тому є необхідність запобіганню при дії цього фактору на електричне та електронне обладнання автомобіля. Проведемо дослідження стійкості роботи модернізованого тягового електропривода локомотива.

11.3.1 Дослідження стійкості роботи системи керування тягового електропривода локомотива в умовах дії іонізуючих випромінювань

За критерій стійкості роботи системи, що розробляється, приймається допустима доза $D_{\text{доп}}(P)$ або граничне значення рівня радіації $P_{\text{гр}}(P/\text{год})$, при яких система буде нормально працювати.

Визначаємо граничні значення дози опромінення $D_{\text{гр}}$, для елементної бази системи, при яких виникають незворотні зміни. Отриманні данні заносимо в таблицю 11.7.

Таблиця 11.7 – Граничні значення експозиційних доз модернізованого тягового електропривода локомотива

№	Блоки ЕП	Елементи системи ЕП	$D_{гр i}, (P)$	$D_{гр}, (P)$
1	Блок управління	Мікрокосхеми	10^5	10^4
2	Блок живлення	Конденсатори (K75-1021-9)	10^6	
		Резистори (ОСС2-35, С2-23)	10^5	
3	Блок підсилення	Транзистори (СМ600НА-5F)	10^4	
		Діоди (0,5W BZX79-C10V)	10^4	

По мінімальному значенню допустимої дози, при якій в елементній базі виникають необоротні зміни, визначаємо границю безпеки роботи РЕА в цілому. Проаналізувавши дані таблиці 11.8, робимо висновок, що самим уразливим елементом модернізованого тягового електропривода локомотива з мінімальною дозою $D_{гр}=10^4 P$ є транзистори та діоди.

Таблиця 11.8 – Значення коефіцієнтів безпеки електропривода

№	Найменування	$K_{бг}, дБ$	$K_{бв}, дБ$	Результат дії
1	Блок живлення, 5В	-69,4	-5,8	Нестійкий
2	Блок живлення, 12 В	-59,8	1,7	Нестійкий
3	Силові елементи, 80 В	-43,3	18,2	Нестійкі

Отже, при екрануванні блоку живлення та блоку управління з використанням екрану 0,15 см зі сталі, система керування буде стійкою в умовах дії електромагнітного випромінювання, при екрануванні силових елементів з використанням екрану товщиною 0,13 см, силові елементи будуть стійкими в умовах дії електромагнітного випромінювання [12].

Отже, після проведення розрахунків визначено, що стійкість роботи системи автоматики стійка при заданому рівні радіації 5,71 Р/год. До дії ЕМІ система керування виявилась нестійкою. Застосування екранування РЕА суттєво підвищує її стійкість в умовах дії електромагнітного випромінювання. В результаті застосування екранів система буде працювати стійко аж до значення напруженості вертикальної складової 11,5 кВ/м. Ще одним варіантом підвищення стійкості апаратури до дії випромінювання є зменшення струмопровідних провідників (їх довжини) шляхом вдосконалення схем устаткування РЕА. Крім цього необхідно екранувати кабелі живлення, а також застосовувати прилади, які б вимикали радіотехнічні схеми на період впливу радіації.

Висновки. В даному розділі було розглянуто охорону праці та безпеку у надзвичайних ситуаціях. У розділі з охорони праці було розглянуто безпечну експлуатацію об'єкта, електробезпеку, технічні рішення з гігієни праці та робочої санітарії, склад повітря робочої зони, освітлення, шум, вібрації та психофізіологічні фактори. У розділі з цивільного захисту нами було проведено дослідження безпеки роботи модернізованого тягового електропривода локомотива. Описано вплив та наслідки дії іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу на працездатність системи електропривода. Після проведення розрахунків визначено, що стійкість роботи системи управління стійка при заданому рівні радіації 5,71 Р/год. До дії ЕМІ система управління виявилась нестійкою.

В ході роботи було визначено коефіцієнти безпеки, які для горизонтальної та вертикальної ділянки блока живлення 5В становлять -69,4 та -5,8 дБ, блока живлення 15В – 59,8 та 1,7 відповідно і силових елементів - 43,3 і 18,2 та досягають номінального значення в 40 дБ.

Для досягнення граничного коефіцієнта безпеки, а відповідно безпечної роботи модернізованого тягового електропривода локомотива було запропоновано ряд заходів, розраховано товщину захисного екрана, для блока живлення 5В – 0,15мм, для блока живлення 15В – 0,15 мм., а для силових елементів 0,13 мм.

ВИСНОВКИ

В даній магістерській кваліфікаційній роботі проведено модернізацію системи керування тягового електропривода локомотива.

В результаті досліджень отримано такі наукові та практичні результати:

1. Проведено аналіз особливостей роботи тягового електроприводу, який показав, що впровадження сучасних технологій в тягові електроприводи сприяє підвищенню їх продуктивності, ефективності та надійності. Математичні моделі управління є важливим інструментом для оптимізації роботи тягових систем, що дозволяє адаптувати їх до змінних робочих умов та досягати високої економічної ефективності. Сформульовані вимоги до електроприводу локомотива, систем автоматичного керування та автоматизації.

2. Виконано розрахунок зусиль, які діють на локомотив під час руху, зокрема, зусиль, що передаються на кожен з чотирьох тягових електродвигунів. На основі отриманих даних визначено потужність одного двигуна та обрано модель СТА-1200У1 як найбільш відповідну до заданих умов експлуатації. Додатково виконано розрахунки моментів інерції рухомого складу та опору руху, що дозволяє врахувати динамічні характеристики локомотива в різних режимах роботи. Також були визначені основні параметри електродвигуна, які стануть базовими для подальшого моделювання системи тягового приводу.

3. Здійснено техніко-економічний розрахунок різних систем електропривода, за результатами якого найекономічнішим варіантом виявилася система "перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ-АД)", оскільки вона забезпечує найнижчі зведені витрати та оптимальніші показники роботи електропривода.

4. Було проведено розрахунок та вибір основних елементів силової частини електропривода для перетворювача частоти. Вибір силових діодів та IGBT-модулів здійснювався з урахуванням максимальних напруг і струмів, що виникають у системі, а також за критерієм їх тривалої та перевантажувальної здатності. Далі, для зарядного кола фільтра було розраховано опір резистора, а також вибрано відповідні транзистори і реле. Для зниження пульсацій струму та захисту від перенапруг було

розраховано параметри індуктивно-ємнісного фільтра. Також було визначено параметри клампера для розсіювання надлишкової енергії у гальмівних режимах, а також вибрано датчики струму та напруги для вимірювання відповідних величин у системі.

5. Розроблені схеми принципів системи керування тягового електропривода локомотива.

6. Для моделювання та аналізу характеристик вибраної системи керування була створена модель двигуна в обертовій системі координат разом із системою керування, яку реалізовано у програмному середовищі MATLAB Simulink.

7. Проведено моделювання процесу розгону рухомого складу. Результати демонструють, що обраний двигун успішно справляється із заданим навантаженням і відповідає вимогам потужності для використання в локомотиві. Графіки також підтверджують, що розроблена система керування асинхронним двигуном забезпечує високий коефіцієнт корисної дії та правильно функціонує в усіх необхідних режимах.

8. Виконано оцінку ефективності інвестицій у модернізацію системи електропривода шахтного електровоза та його системи керування.

9. Визначено ключові принципи безпечної експлуатації шахтного електровоза в умовах впливу шкідливих факторів промислового середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Басов, Г. Г. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу. Ч. 2. / Г. Г. Басов, С. І. Яцько. – Харків: «Апекс+», 2005. – 248 с.
2. Україна: транспорт. [Електронний ресурс] / Велика українська енциклопедія. – Режим доступу: <https://vue.gov.ua/> Україна:_транспорт
3. Orlov Yu.A. New freight electric locomotive with alternating current / Yu.A. Orlov, A.I. Leshchev, K.N. Suslova // Bulletin of the Eastern-Ukrainian National University named after V.Dal. - Lugansk, 2004. - No. 8 (78). - Part 1. - P. 175-179.
4. Вимірювальні системи сучасних електромеханічних комплексів. Навчальний посібник / І.В. Касаткіна, С.М. Бойко – Кривий Ріг, 2022. – 161 с.
5. Грабко В. В., Кучерук В. Ю., Возняк О. М. Мікропроцесорні системи керування електроприводами. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2009. – 146 с.
6. Novonty D. W. and Lipo T. A. Vector Control and Dynamics of AC Drives. – New York: Oxford University Press Inc, 2000. С. 9-12.
7. Fedyaeva G.A. Forecasting of dynamic processes in non-stationary and emergency modes of traction electric drives with asynchronous motors of electric trains: dis. ... Doctor of Technical Sciences: 05.09.03, 05.22.07 / Fedyaeva Galina Anatolyevna. - Moscow, 2008. - 372 p.
8. Trzynadlowski A.M. Control of induction motor / Andrzej M. Trzynadlowski. – New York: Academic Press, 2001. – 226 p.
9. Грабко В.В., Розводюк М.П., Грабенко І.В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина І. Машини постійного струму: Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 86 с.
10. Sieklucki, G. Analysis of the transfer-function models of electric drives with controlled voltage source / G. Sieklucki // Przegląd elektrotechniczny. – 2012. – № 88. – P. 250 – 255.
11. Зайченко Ю.П., Мартиненко І.В. Сучасні системи керування асинхронними електроприводами. – Київ: Либідь, 2016. – 224 с.
12. Кучерук В.Ю., Грабко В.В. Основи теорії електроприводів. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 168 с.

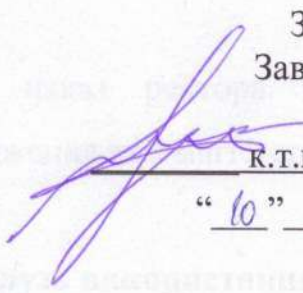
13. Коваленко В.М. Тягові електроприводи локомотивів. – Дніпро: НМетАУ, 2015. – 150 с.
14. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. – 672 p.
15. Пилипенко В. І., Стрільчук М. П. Модернізація електроприводів транспортних засобів. – Харків: ХНАДУ, 2018. – 210 с.
16. Leonhard W. Control of Electrical Drives. – Berlin: Springer, 2001. – 450 p.
17. Бойко С.М., Касаткіна І.В. Системи автоматизованого керування електроприводами. – Кривий Ріг: НМетАУ, 2020. – 187 с.
18. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. – Oxford: Clarendon Press, 1998. – 320 p.
19. Савич О.М., Романов О.В. Перетворювачі частоти для систем керування електроприводами. – Львів: ЛНТУ, 2017. – 145 с.
20. Гончаренко О.П., Войтюк В.М. Дослідження динамічних характеристик тягових асинхронних двигунів. – Одеса: ОНПУ, 2018. – 123 с.
21. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
22. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва.
23. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
24. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
25. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.

ДОДАТКИ

Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗАТВЕРДЖЕНО
Зав. кафедри КЕМСК

 К.т.н., доц. Микола МОШНОРИЗ

“ 10 ” 09 2024р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

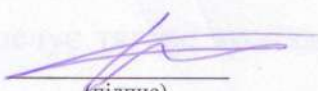
на магістерську кваліфікаційну роботу
на тему:

**МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА
ЛОКОМОТИВА**

8-24.МКР.012.00.000 ТЗ

Керівник роботи:

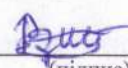
к.т.н., доц. Валентин ГРАБКО


(підпис)

“ 10 ” вересня 2024р.

Розробив студ. гр. ЕПА-23м

Ярослав ПУСТОВІТ .


(підпис)

“ 10 ” 09 2024р.

Вінниця 2024 р.

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки «Модернізація системи керування тягового електропривода локомотива».

Скорочене найменування розробки – «Тяговий електропривод локомотива». Замовник – кафедра електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем магістерських робіт.

3 Призначення розробки і галузь використання

Електропривод локомотива призначений для руху вагонного складу.

4 Вимоги до розробки

Електропривод локомотиву повинен забезпечувати надійну роботу в тривалому режимі при великій частоті включень.

5 Комплектація розробки

Робоча машина тягового електропривода локомотива складається з тягового асинхронного електродвигуна, системи перетворювача частоти, редуктора, системи гальмування та допоміжного устаткування. Основною рушійною частиною є асинхронний двигун із короткозамкнутим ротором, що забезпечує тягове зусилля локомотива. Система керування електроприводом складається з мікропроцесорного контролера, контурів регулювання струму та швидкості, датчиків зворотного зв'язку, а також апаратури захисту та контролю роботи електродвигуна. Електрична мережа та системи керування інтегровані для досягнення високої точності та надійності у процесі руху локомотива.

6 Технічні характеристики

Локомотив має зчіпну масу $m=100\text{т}$, конструкційну швидкість $v=100\text{км/год}$, максимальну швидкість $v_{\text{max}}=160\text{км/год}$, та чотири приводні осі (відповідно, чотири тягові електродвигуни).

7 Джерела розробки

1. Басов, Г. Г. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу. Ч. 2. / Г. Г. Басов, С. І. Яцько. – Харків: «Апекс+», 2005. – 248 с.

2. Грабко В. В., Кучерук В. Ю., Возняк О. М. Мікропроцесорні системи керування електроприводами. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2009. – 146 с.

3. Грабко В. В., Розводюк М. П., Грабенко І. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина І. Машини постійного струму: Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 86 с.

4. Бойко С. М., Касаткіна І. В. Системи автоматизованого керування електроприводами. – Кривий Ріг: НМетАУ, 2020. – 187 с.

8 Етапи виконання

Зміст етапу	Термін виконання	
	початок	кінець
8.1 Збір інформації, яка необхідна для дослідження	14.10	20.10
8.2 Проведення дослідних розрахунків	20.10	20.11
8.3 Розробка робочих креслень	20.11	22.11
8.4 Написання розрахунково-пояснювальної записки і захист магістерської роботи	22.11	07.12

9 Елементна база

Двигун, апаратура керування і захисту, провідники, кабелі і т.п. виробництва України чи країн близького зарубіжжя.

10 Конструктивне виконання

Електропривод виготовляється окремими блоками, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки у пило-вологозахищеному виконанні.

11 Показники технологічності Електропривод локомотиву – двигун, апаратура керування, провідники, кабелі і т.п. виконується на сучасній елементній базі, його монтаж, заземлення, струмопровід повинен відповідати правилам улаштування електроустановок.

12 Технічне обслуговування і ремонт

Технічне обслуговування здійснюється слюсарями-електромонтажниками та слюсарями КВП і А відповідної кваліфікації. Технічний огляд механізму здійснюється мінімум один раз на 3 місяці. Ремонт здійснюється інженерами-електромеханіками та техніками-електромеханіками, фахівцями з електромеханічних систем автоматизації та електропривода.

13 Порядок контролю та прийняття

Виконання етапів графічної та розрахункової документації магістерської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

Додаток Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА
ЛОКОМОТИВА

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Модернізація системи керування тягового електропривода локомотива»

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-23м

Науковий керівник: к.т.н., доц. Грабко В.В.
(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності Turnitin

Оригінальність	77 %
Загальна схожість	23 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

☐ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.

☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор _____ Пустовіт Я.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Особа, відповідальна за перевірку _____
(підпис) (прізвище, ініціали)

Експерт _____
(за потреби) (підпис) (прізвище, ініціали, посада)

Мета та задачі магістерської кваліфікаційної роботи

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження в даній роботі є покращення експлуатаційних характеристик системи електропривода локомотива із використанням в якості тягових двигунів змінного струму за рахунок вдосконалення існуючої системи електроприводу та системи керування тяговими двигунами.

Відповідно до вказаної мети необхідно розв'язати такі задачі:

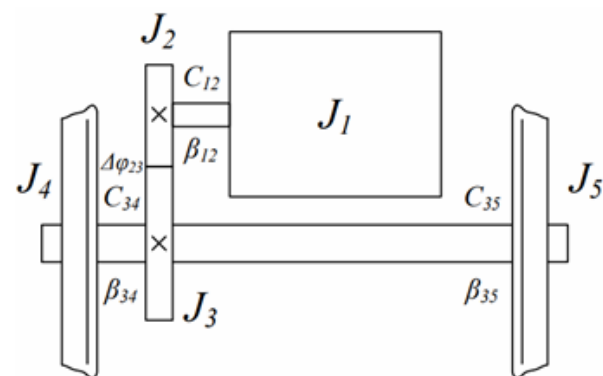
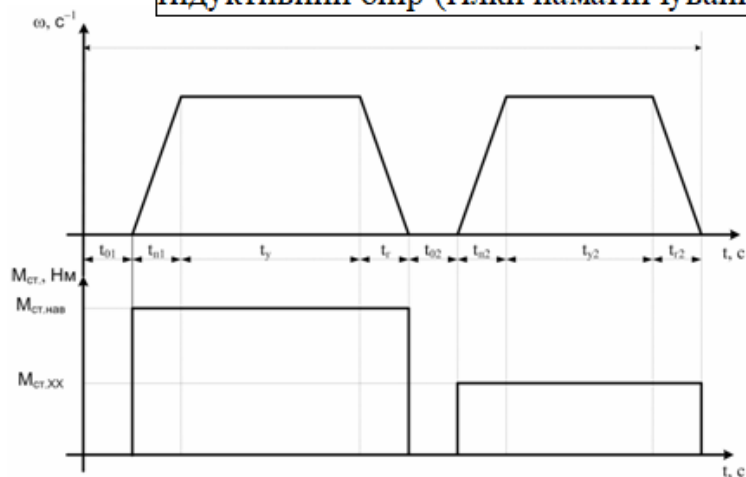
Для досягнення цієї мети потрібно розв'язати наступні задачі:

- розглянути експлуатаційні та технічні характеристики об'єкта дослідження;
- провести додаткові розрахунки для вибору потужності двигунів локомотиву, виконати розрахунки та побудову навантажувальної діаграми механізму;
- провести розрахунки економічної доцільності використання найбільш оптимального з технічної та економічної точки зору варіанту системи електропривода локомотива;
- вибрати найбільш оптимальний варіант системи керування локомотива з позиції використання в якості привідної системи на базі двигунів змінного струму та заміни існуючої релейної системи керування на сучасну мікропроцесорну систему;
- провести моделювання запропонованої системи керування з метою перевірки адекватності поведінки системи фізичним та електромеханічним процесам;
- провести розрахунок ефективності капіталовкладень для модернізації системи електропривода локомотива та його системи керування;
- сформулювати положення щодо безпечної роботи персоналу в умовах дії шкідливих чинників промислового середовища.

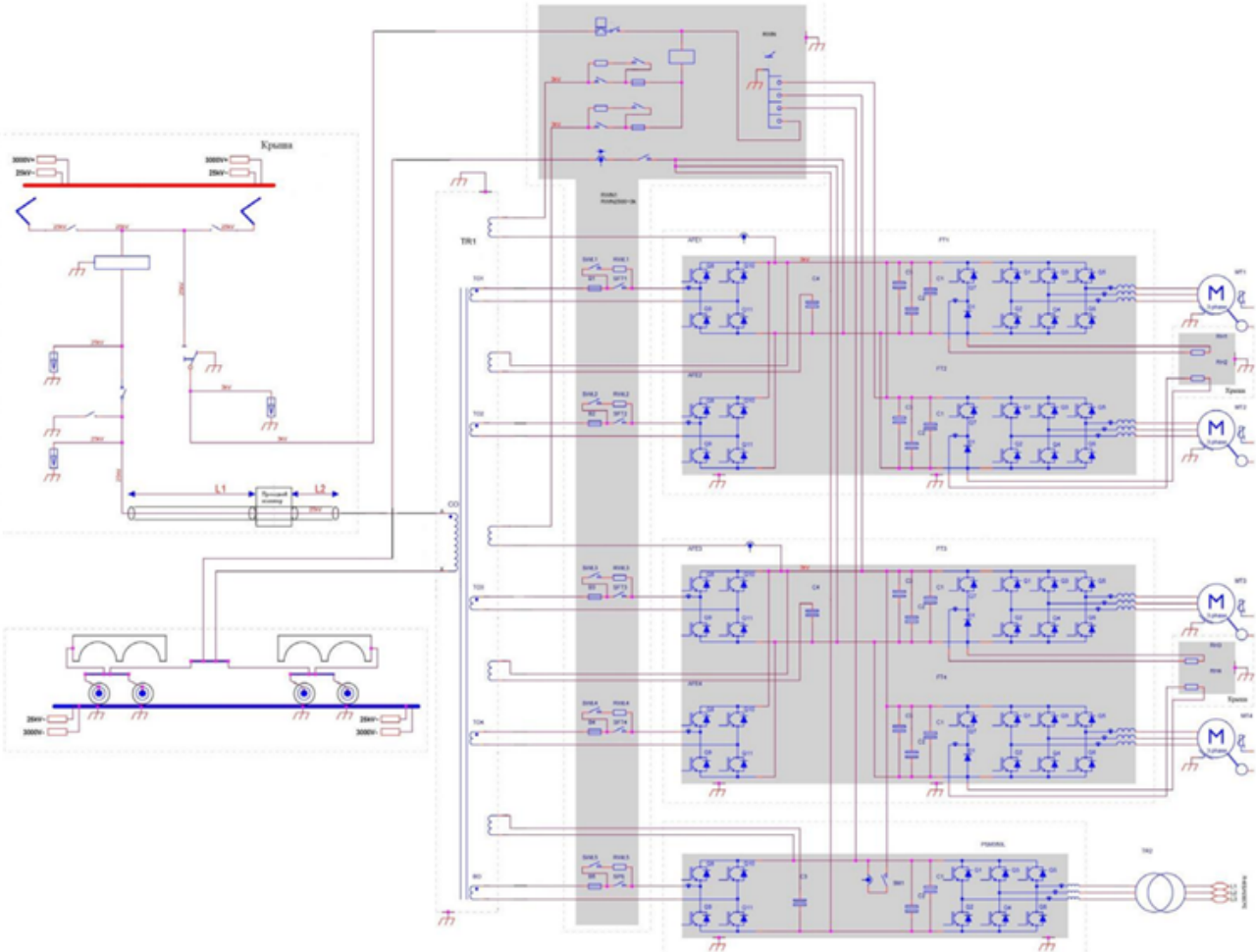
Об'єкт дослідження – процес контролю керування системою електропривода..

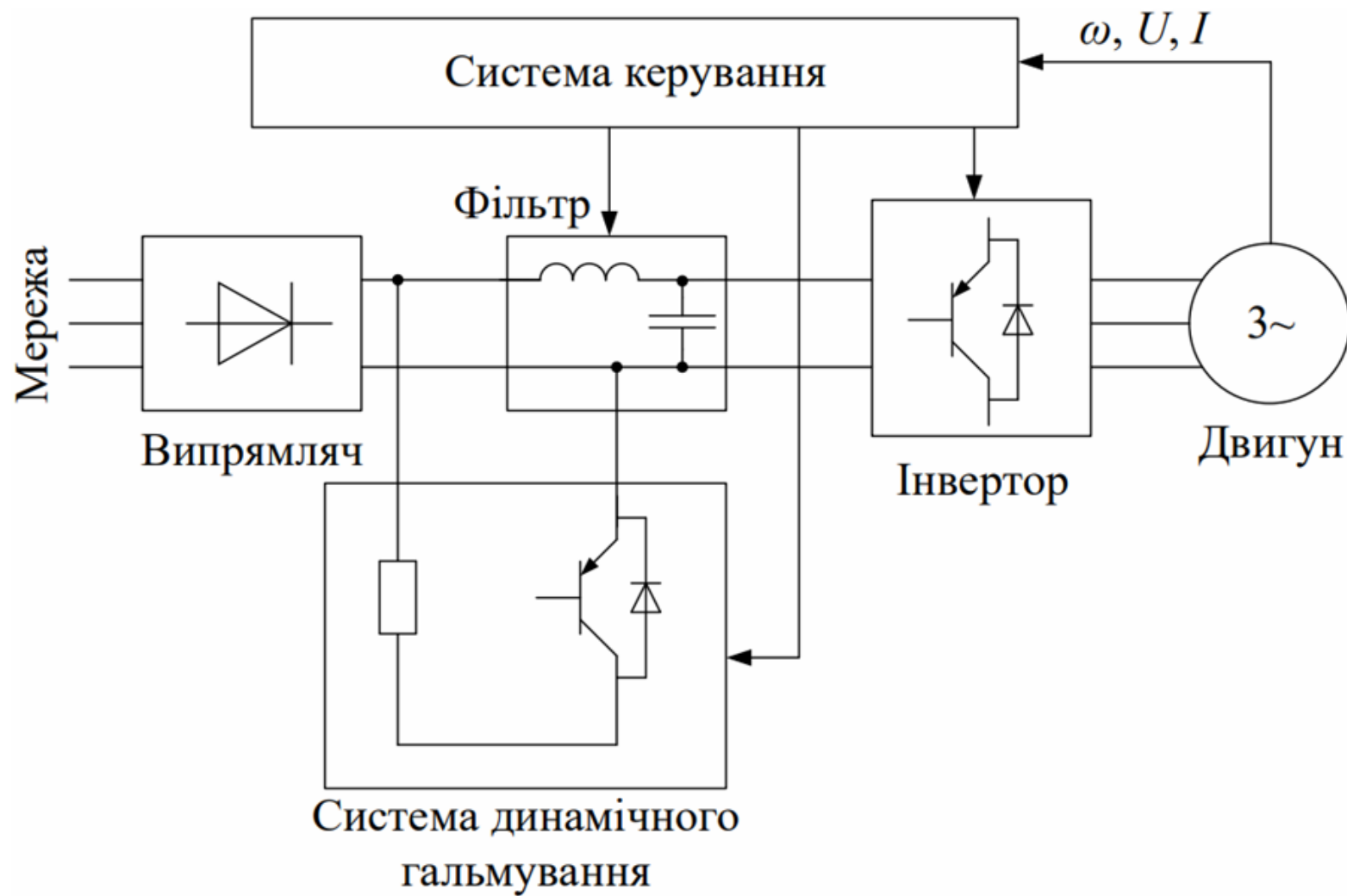
Предмет дослідження – системи керування тяговим електроприводом.

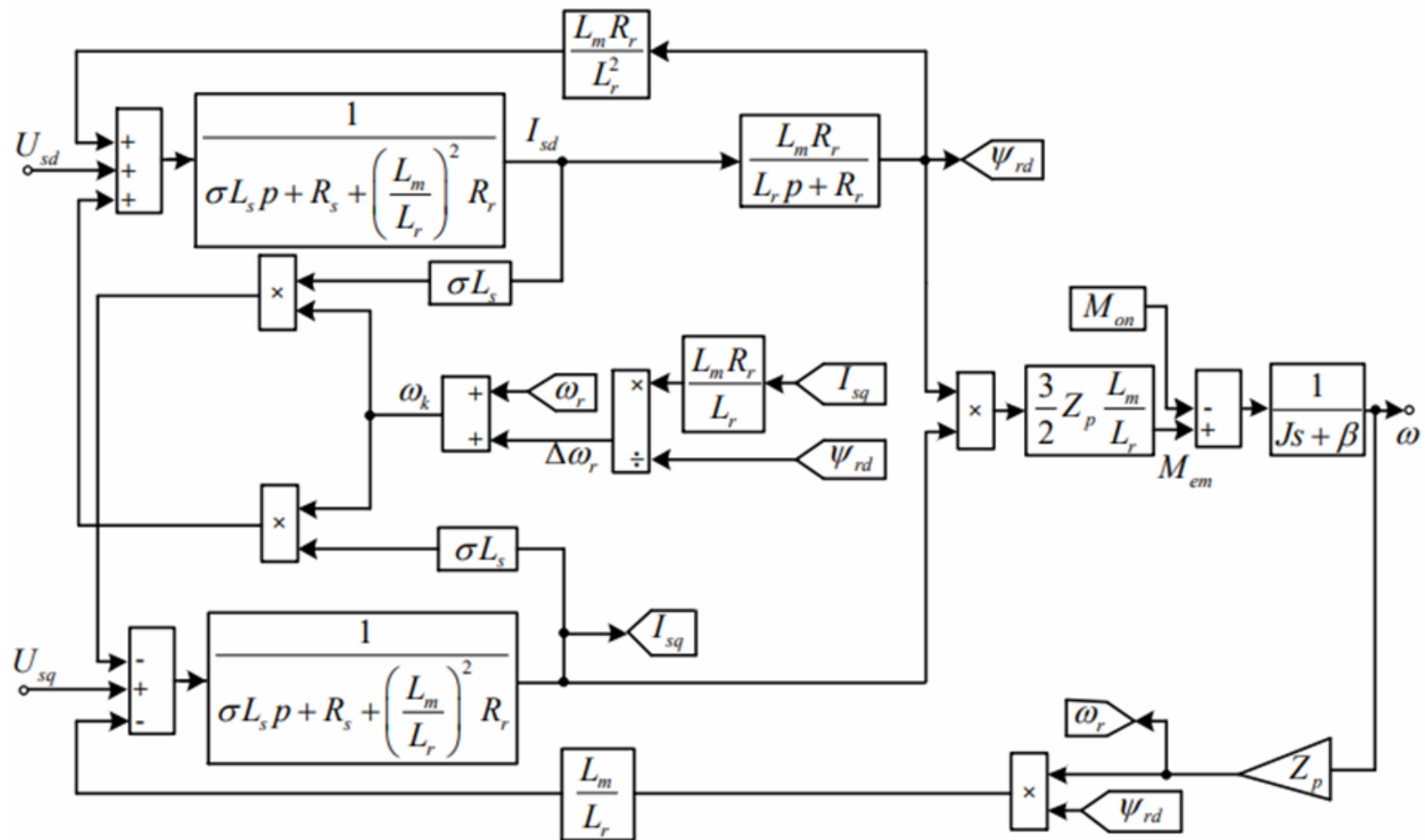
Назва параметру	Величина
Тип двигуна	СТА-1200У1
Номінальна потужність	1200 кВт
Кількість фаз статора	$m = 3$
Число пар полюсів	$p = 3$
Умовно номінальна частота мережі	56,9 Гц
Номінальна фазна напруга	1080 В
Синхронна частота обертання	1138 об/хв
Номінальний момент на валу	10070 Нм
Сковзання в номінальному режимі роботи	0,01
Фазний струм статора в номінальному режимі (діюче значення)	465 А
Коефіцієнт потужності	0,833
Коефіцієнт корисної дії	0,955
Параметри схеми заміщення:	
Активний опір фази обмотки статора	0,033 Ом
Індуктивний опір фази обмотки статора	0,228 Ом
Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора	0,025 Ом
Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора	0,238 Ом
Індуктивний опір (гілки намагнічування)	5,392 Ом

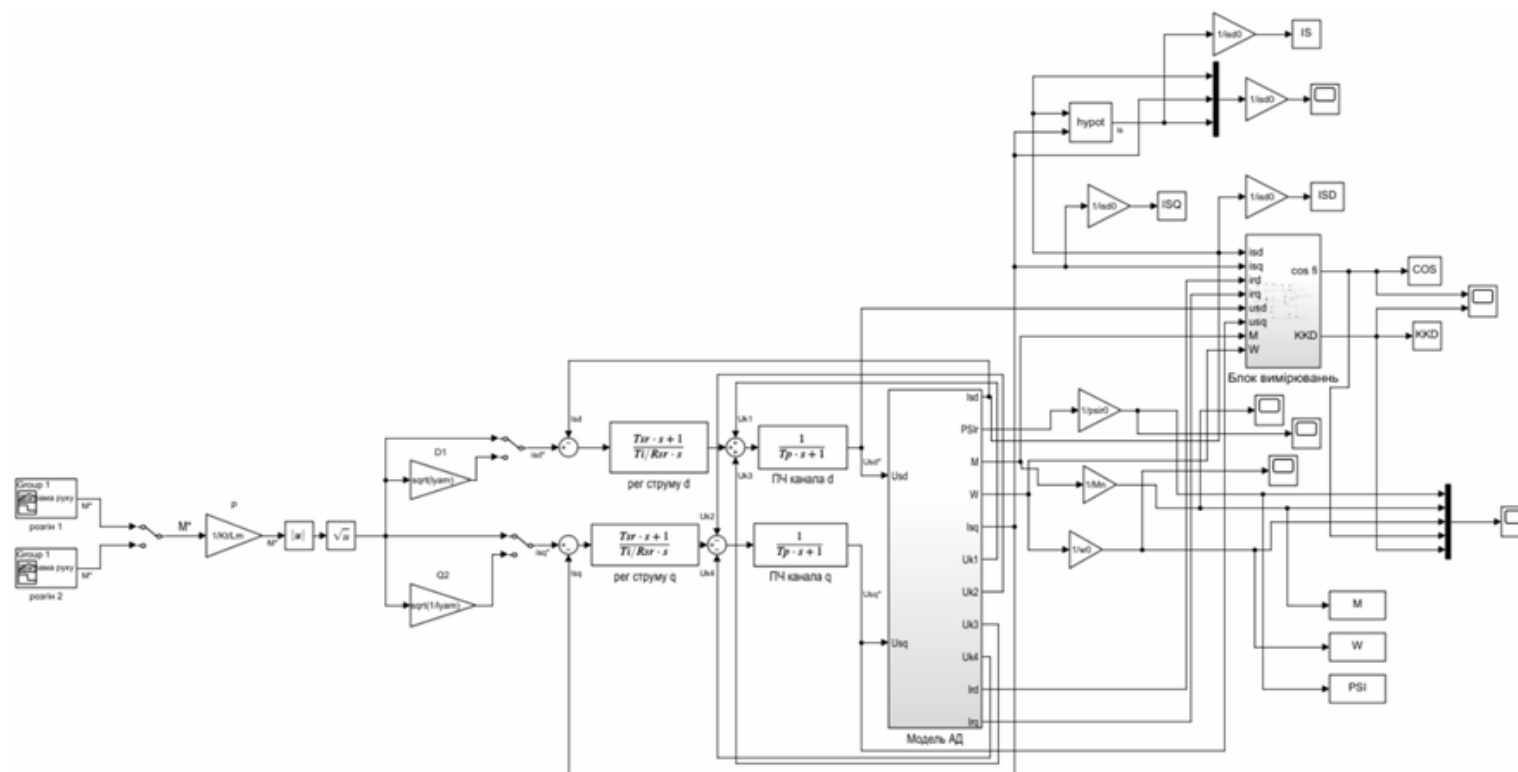
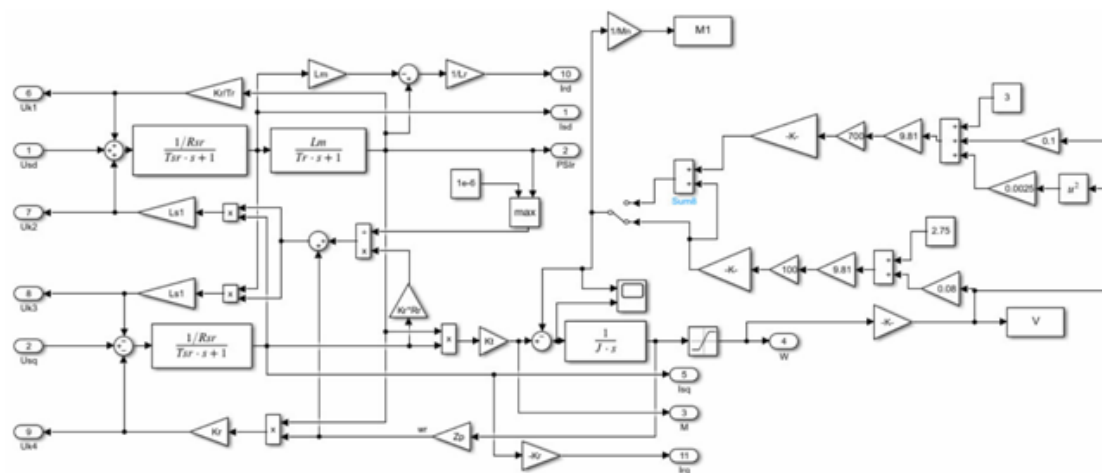


Показники	ТП-ДПС	ПП-ДПС	РКС-ДПС	ПЧ-АД
Розрахована Рн двигуна, кВт	1200	1200	1200	1200
Вартість двигуна (Д), грн.	1 300 000	1 250 000	1 400 000	1 300 000
Вартість системи керування (СК), грн.	1 500 000	1 400 000	1 600 000	1 600 000
Капіталовкладення $K = Д + СК$, грн.	2 800 000	2 650 000	3 000 000	2 900 000
Амортизаційні відрах., $Са = Еа * К$, грн.	140 000	132 500	150 000	145 000
$Ео$	0,015	0,015	0,015	0,015
Витрати обслуг. і ремонт, $Со = Ео * К$, грн.	42 000	39 750	45 000	43 500
Витрати на електроенергію, грн.	450 000	440 000	460 000	400 000
Собівартість $С = Са + Со + Сw$, грн.	632 000	612 250	655 000	588 500
Зведені витрати $Z = Еn * К + С$, грн.	1 932 000	1 857 500	2 055 000	1 835 500

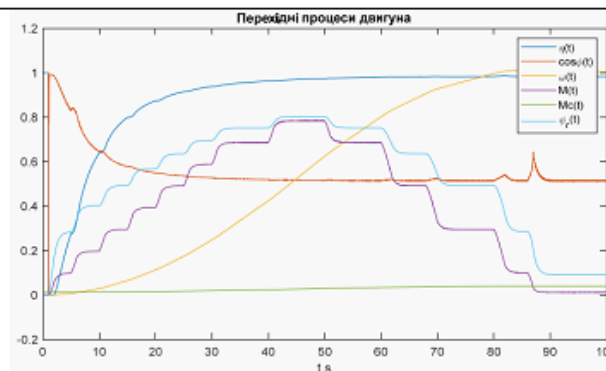
[illegible]



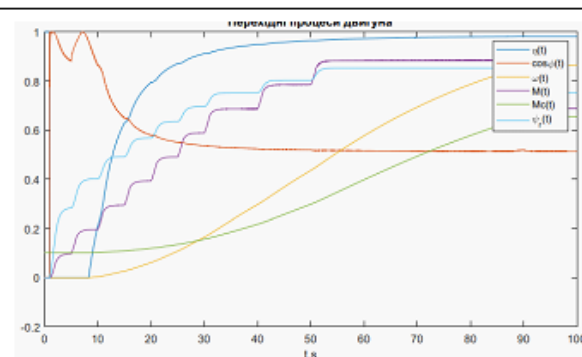




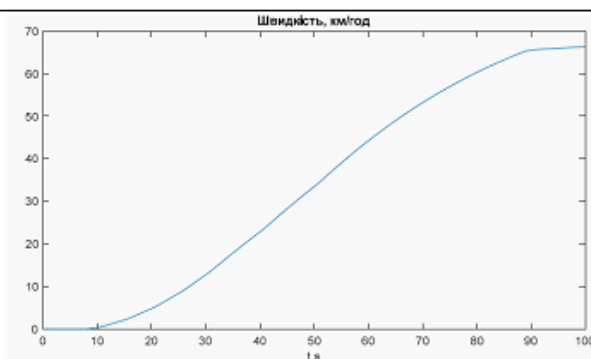
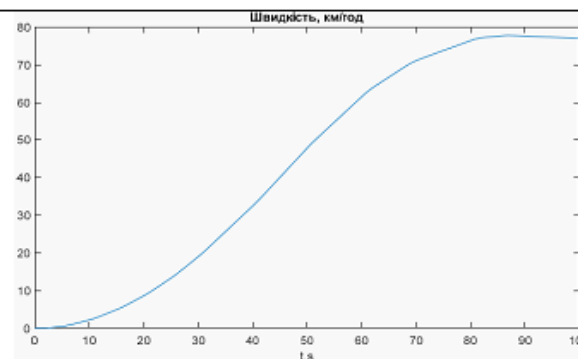
Дослідження перехідних процесів при розгоні
локомотиву без вагонів



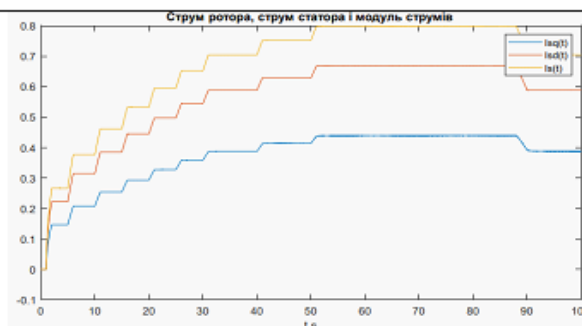
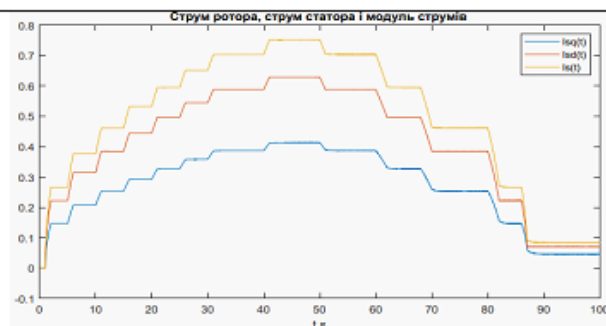
Дослідження перехідних процесів при розгоні
локомотиву з вагонами (10 вагонів масою 600т)



характеристики зміни ККД, $\cos\phi$, кутової швидкості, моменту двигуна, моменту навантаження та потокозчеплення



графік набору швидкості локомотива



перехідні процеси струмів статора при використанні стратегії «максимальний ампер на момент»

Висновки по роботі

1. Здійснено техніко-економічний розрахунок різних систем електропривода, за результатами якого найекономічнішим варіантом виявилася система "перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ-АД)", оскільки вона забезпечує найнижчі зведені витрати та оптимальніші показники роботи електропривода.
2. Було проведено розрахунок та вибір основних елементів силової частини електропривода для перетворювача частоти.
3. Розроблені схеми принципові системи керування тягового електропривода локомотива.
4. Для подальшого моделювання і дослідження характеристик обраної системи керування було розроблено модель двигуна в обертовій системі координат та системи керування, а також створено її в програмному середовищі MATLAB Simulink.
5. Було проведено моделювання розгону рухомого складу. З результатів видно, що обраний двигун відпрацьовує задане навантаження та цілком підходить по потужності для встановлення на локомотив. Також на графіках видно, що розроблена система керування асинхронним двигуном має високий коефіцієнт корисної дії та правильно відпрацьовує потрібні режими.

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Модернізація системи керування тягового електропривода локомотива»

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-23м

Науковий керівник: к.т.н., доц. Грабко В.В.
(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності Turnitin

Оригінальність	77 %
Загальна схожість	23 %

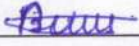
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

☐ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.

☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор 
(підпис)

Пустовіт Я.В
(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Палюк О.А
(прізвище, ініціали)

Експерт

(за потреби)

(підпис)

(прізвище, ініціали, посада)



					08-24.МКР.012.00.000				
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Модернізація системи керування тягового електропривода локомотива	Літера		Маса	Масштаб
Розробив		Пустовіт Я.В.	<i>Пустовіт</i>	19.11.24		у			
Перевірив		Мошноріз М.М.	<i>Мошноріз</i>	19.11.24					
Т.Контр.									
					Аркуш		Аркушів		
Рецензент Шумська					ВНТУ				
Н.Контр. Падаровська					Група ЕПА 23м				